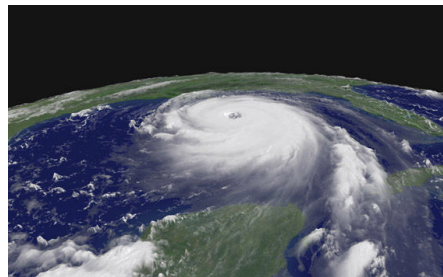


Departamento de Engenharia Rural

Universidade de Évora

Fundamentos Teóricos de Detecção Remota



Adélia Maria Oliveira de Sousa e José Rafael Marques da Silva

2011

Índice

I. Fundamentos da Detecção Remota.....	4
1.1. Radiação eletromagnética.....	4
1.2. Espectro eletromagnético.....	7
1.2.1. O sol e a constante solar.....	7
1.3. Leis da radiação térmica.....	8
1.4. Interação com a atmosfera e correcção de imagens.....	13
1.5. Interação com a superfície terrestre.....	14
1.5.1. Comportamento espectral da vegetação.....	16
1.5.2. Comportamento espectral do solo.....	17
1.5.3. Comportamento espectral das rochas.....	18
1.5.4. Comportamento espectral da água.....	19
1.6. Sensores activos e passivos.....	19
II. Características das imagens.....	20
2.1. Conceito de resolução.....	20
2.1.1. Resolução espectral.....	20
2.1.2. Resolução espacial.....	21
2.1.3. Resolução temporal.....	21
2.1.4. Resolução radiométrica.....	22
III. Sistemas de Detecção Remota.....	23
3.1. Plataformas e suas características.....	23
3.2. Componentes dos satélites.....	23
3.3. Órbitas dos satélites.....	23
3.3.1. Órbitas circulares e elípticas.....	23
3.3.2. Satélites geoestacionários.....	24
3.3.3. Satélites quase polares.....	25
3.4. Sensores e suas características.....	26
3.4.1. Sensores ópticos.....	26
3.4.2. Sensores térmicos.....	27
3.4.3. Sensores hiperespectrais.....	28
3.4.4. Microondas – Radar.....	28
3.5. Aplicações e características dos satélites e respectivos sensores ópticos.....	29
3.5.1. Satélites para observações da superfície da Terra.....	29
3.5.2. Satélites para observações meteorológicas.....	38
IV. Processamento e análise de imagens.....	40
4.1. Interpretação visual.....	40
4.2. Pré-processamento.....	40
4.2.1. Correcções geométricas.....	40
4.2.2. Ortorectificação de imagem.....	42
4.2.3. Correcções radiométricas.....	43
4.3. Realce de uma imagem.....	43
4.4. Transformação dos dados.....	43
4.4.1. Quocientes e índices de vegetação.....	43
4.4.1.1. Índices baseados em quocientes.....	44
4.4.1.2. Índices de tipo ortogonal (distância à linha do solo).....	45
4.4.2. Análise em componentes principais.....	46
4.4.3. Transformação Tasseled Cap.....	47
4.5. Classificação de imagem.....	49

4.5.1. Classificação supervisionada ou assistida.....	52
4.5.2. Classificação não supervisionada ou automática	55
4.5.3. Validação dos resultados da classificação.....	56

I. Fundamentos da Detecção Remota

A Detecção Remota é uma técnica que nos permite obter informação sobre um objecto ou fenómeno pela análise de dados recolhidos por um dispositivo que não está em contacto com o objecto ou fenómeno, ou seja sem contacto mecânico. Mas obviamente, esta definição é muito generalista, porque também cobre campos das técnicas de comunicação e das percepções sensoriais. Na prática, a maioria das aplicações que são consideradas fazendo parte da detecção remota têm que se enquadrar nos seguintes critérios:

- A transferência de informação entre o alvo e o sensor (observador) ocorre por meio de radiação eletromagnética. Isto imediatamente exclui a detecção remota por meio de ondas sonoras (fala, sentido de audição, mas também som via sonar) ou por via química (cheiro, feromonas,...).
- A observação leva à produção de uma imagem espacial. Esta condição elimina um vasto campo de ferramentas de comunicação (telefone telégrafo, rádio...) que são também baseadas na transferência de ondas eletromagnéticas.
- As imagens terão que ser em formato digital, como tal podem ser armazenadas, processadas e interpretadas em computadores. Desta maneira, a visão humana, a fotografia e a fotografia aérea clássica (imagens analógicas) ficam fora do âmbito da detecção remota.
- A observação é feita do espaço. O sistema de imagem é colocado numa plataforma espacial ou satélite. Isto também exclui o uso de sensores digitais a bordo de aviões normais.

Claro que muitas excepções podem ser feitas a estas regras gerais e um número de sobreposições existem realmente com outras aplicações (ex: fotografia aérea). Para além disso, a detecção remota não só inclui o processo de registo da imagem, mas também as actividades subsequentes relacionadas com a distribuição, comercialização, processamento e interpretação da imagem, até à entrega do produto final (mapa do uso do solo). À parte da pesquisa em astronomia (ex. do sol, estrelas ou galáxias distantes), a terra ainda é o objecto de estudo predominante. Dentro deste domínio da observação da terra do espaço, um vasto campo de aplicações pode ser apontado: o equipamento óptico pode ser especificamente desenhado para o estudo da atmosfera (meteorologia, climatologia), da superfície da terra (uso da terra, agricultura, geologia,...), dos oceanos ou pólos (glaciologia). Em suma, a detecção remota podia ser definida como o uso de sensores digitais a bordo de plataformas espaciais e/ou satélites com vista a colecção periódica de dados sinópticos da Terra, e o subsequente processamento e análise desta informação (imagens).

1.1. Radiação eletromagnética

A luz ou de uma forma geral a radiação eletromagnética (REM) - é uma forma de energia que é transferida num certo período de tempo, de um ponto para o outro. A descrição da REM passa portanto por um aspecto energético e um aspecto temporal. A REM apenas é perceptível (visível, sensível, mensurável...) assim que colidir com uma determinada superfície. Portanto a terceira dimensão a considerar será a dimensão espacial. Um quarto aspecto a ser considerado, é a distribuição hemisférica da REM: a REM, que chega a uma determinada superfície, varia com a orientação. Este aspecto direccional pode ser contabilizado se subdividirmos o hemisfério num grande número (infinitamente pequenos) de ângulos sólidos e considerar a contribuição de cada um deles. O quinto e último aspecto deve-se à componente espectral: a radiação é composta por diferentes comprimentos de onda. Os cinco aspectos mencionados estão sumariados na Tabela 1.1.

Quadro 1.1 – Os cinco aspectos considerados sobre a radiação eletromagnética.

Energético	Energia	Q	Joule	J
Temporal	Tempo	t	Segundo	S
Espacial	Superfície	A	metro quadrado	m ²
Direccional	Ângulo sólido	Ω	Sterad	Sr
Espectral	Comprimento de onda	λ	micrometro= 10^{-6} m	μ m
			nanometro= 10^{-9} m	nm

A aquisição de informação é feita através do registo da energia reflectida ou emitida (sob a forma de radiação eletromagnética) pelo objecto a detectar. Os dados brutos assim obtidos são depois processados e analisados para extrair informação de interesse sobre o objecto a detectar. Isto é exemplificado pelos sistemas de aquisição de imagens, onde estão envolvidos os seguintes sete elementos:

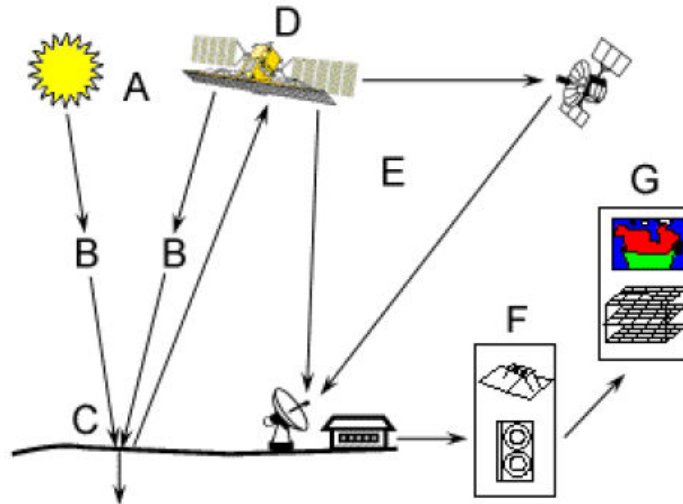


Fig. 1.1 – Processo de Detecção Remota.

(Fonte: <http://ccrs.nrcan.gc.ca/resource/tutor/fundam/chapter1>)

A – Fonte de energia ou iluminação – o primeiro requerimento é a existência de uma fonte de energia que ilumine ou forneça radiação eletromagnética ao objecto em estudo.

B – A radiação e a atmosfera – a energia emitida pela fonte entra em contacto e interage com a atmosfera que atravessa na sua viagem até ao objecto. Esta interacção pode ter lugar uma segunda vez, quando a energia é reflectida pelo objecto para o sensor.

C – Interação com o objecto – após a energia ter atingido o objecto, passando pela atmosfera, esta interage com o objecto dependendo das propriedades do objecto e da radiação.

D – Registo da energia pelo sensor – após a energia ter sido difundida ou emitida pelo objecto, é necessário um sensor (remoto – que não se encontra em contacto com o alvo) para recolher e registar a radiação eletromagnética.

E – Transmissão, recepção e processamento – a energia registada pelo sensor é transmitida, normalmente de forma electrónica, para uma estação que recebe e processa os dados para uma imagem.

F – Interpretação e análise – a imagem processada é interpretada, visual e/ou digitalmente, de forma a extrair informação sobre o objecto iluminado.

G – Aplicação – o objetivo final do processo de detecção remota é atingido quando aplicamos a informação que conseguimos extrair da imagem do objecto, de modo a compreendê-lo melhor, revelar novas informações, ou contribuir para a resolução de um determinado problema.

Estes sete elementos descrevem o processo da detecção remota, de jusante para montante, até atingir o seu objetivo final.

A radiação eletromagnética consiste num campo elétrico (E) que varia em magnitude na direcção perpendicular à direcção em que a radiação viaja, e um campo magnético (M) formando um ângulo recto com o campo elétrico. Ambos os campos viajam à velocidade da luz (c).

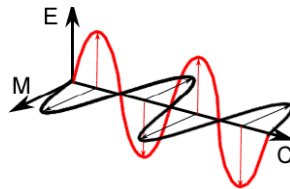


Fig 1.2. Radiação eletromagnética.

(Fonte: <http://ccrs.nrcan.gc.ca/resource/tutor/fundam/chapter1>)

Em detecção remota, a radiação eletromagnética é normalmente caracterizada pela localização dos comprimentos de onda, λ no espectro de radiação eletromagnética. A unidade do Sistema Internacional (SI) é o micrómetro ($\mu\text{m} = 10^{-6} \text{ m}$). O espaço ocupado pela radiação visível, num destes gráficos, é muito pequeno, porque a sensibilidade espectral da visão humana abrange apenas a gama dos $0,40 \mu\text{m}$ aos $0,7 \mu\text{m}$.

O comprimento de onda e a frequência encontram-se relacionados através da seguinte equação:

$$C = \lambda \nu$$

onde : C é a velocidade da luz.

λ é o comprimento de onda (m).

ν é a frequência (ciclos por segundo, HZ) .

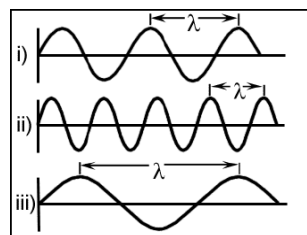


Figura 1.3 - Comprimento de onda.

(Fonte: <http://ccrs.nrcan.gc.ca/resource/tutor/fundam/chapter1>)

1.2. Espectro eletromagnético

O espectro eletromagnético é a distribuição da intensidade da radiação eletromagnética em todo o seu intervalo, com relação ao seu comprimento de onda ou frequência (Fig.1.4).

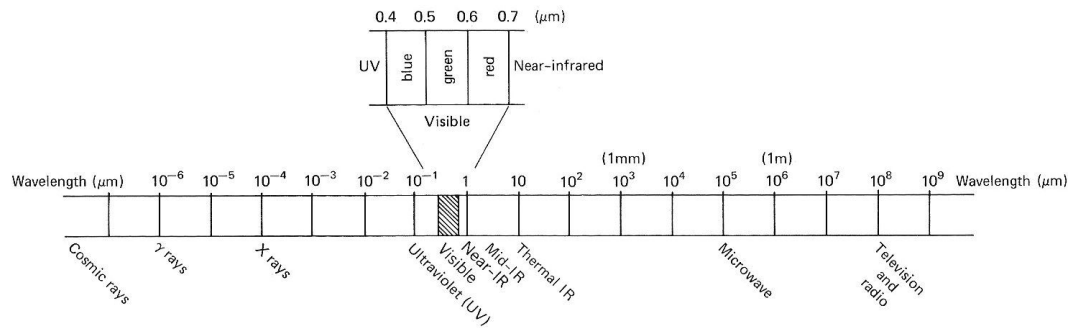


Figura 1.4 . O espectro eletromagnético. (Fonte: Lillesand & Kiefer, 1994)

Quadro 1.2. Zonas do espectro electomagnético utilizadas em detecção remota.

Zona do espectro		Intervalo de comprimento de onda
Ultravioleta		0,30 – 0,38 μm
Visível	azul	0,42 – 0,49 μm
	verde	0,49 – 0,58 μm
	vermelho	0,58 – 0,70 μm
Infravermelho (IV)	IV próximo (IVP)	0,70 – 1,30 μm
	IV médio (IVM)	1,30 – 3 μm
	IV térmico (IVT)	> 3 μm
Microondas		1 mm – 1m

A região do **Visível** (VIS), representa o intervalo de comprimento de onda a que o olho humano responde.

1.2.1. O Sol e a constante Solar

O sol é a fonte primária da energia utilizado em detecção remota passiva, que estuda o seu fluxo radiante, modificado por dispersão, reflexão e absorção causadas pela atmosfera e superfície terrestres. Pode-se considerar-se o Sol como uma esfera de matéria gasosa, aquecida por reacções nucleares em actividade no seu interior. A superfície aparente do sol designa-se por fotosfera e tem um diâmetro de $1,3914 \times 10^6$ km.

Subdivisões do espectro e janelas atmosféricas

As janelas atmosféricas são bandas espectrais com uma elevada transmitância atmosférica, através das quais a radiação passa livremente do espaço para a Terra ou vice-versa. A Fig.1.5 indica-nos a existência de quatro janelas importantes.

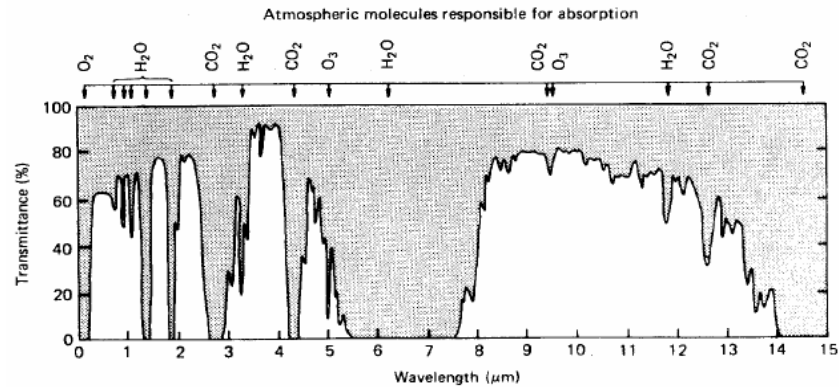


Figura 1.5 - Transmitância espectral da atmosfera (valores típicos para céu limpo), e as moléculas responsáveis pela absorção da radiação. As zonas com elevada transmitância representam as janelas atmosféricas.

Sem contar com as bandas de absorção de água que estão à volta de 1,4 μm e 1,9 μm , existe uma janela importante no campo óptico (visível), o que permite às radiações de onda curta chegar à Terra. A segunda janela está situada no IVM (3 – 6 μm), mas os campos de radiação da Terra e do Sol nesta banda são muito fracos. A terceira janela coincide exactamente com a banda IVT (8-14 μm) o que permite a saída da radiação terrestre para o espaço. Entre 14 μm e 0,1cm, toda a radiação (se existir), é bloqueada pela atmosfera. A quarta janela pode ser encontrada no domínio dos microondas (0,1cm - 50cm) e é explorada por observações de RADAR.

Se a observação terrestre é o nosso objetivo então estamos limitados a estas janelas atmosféricas. Contudo, as zonas espectrais com uma baixa transmitância podem no entanto ser úteis para estudos meteorológicos e atmosféricos.

1.3. Leis da Radiação Térmica

Os objectos podem emitir radiação como resultado de vários processos, por exemplo descargas eléctricas (ondas de rádio em antenas transmissoras, tubo de luz das televisões) e fenómenos físico-químicos (fluorescência). No entanto, a causa de longe mais importante relaciona-se com o conteúdo térmico ou temperatura: qualquer objecto com uma temperatura absoluta acima dos 0 K (Kelvin) emite “**radiação térmica**”, um processo que é quantificado pelas leis de Plank, Wien, Stefan-Boltzmann e Kirchhoff.

Lei de Planck

A lei de Planck fornece uma equação para a **exitância espectral hemisférica M_λ** . Emitida por qualquer objecto em equilíbrio, como resultado da sua temperatura interna:

$$M_\lambda = \frac{\varepsilon_\lambda \cdot C_1}{\lambda^5 \cdot (\exp(C_2(\lambda.T)) - 1)}, \quad [\text{W/m}^2/\text{nm}]$$

sendo λ comprimento de onda [nm]

T = Temperatura absoluta [K]

ε_λ = emissividade espectral ($0 < \varepsilon_\lambda < 1$)

$C_1 = 3,7415 \times 10^{20}$ [W. nm⁴/m²]

$C_2 = 1,4388 \times 10^7$ [nm.K]

Com esta equação pode-se prever a exitância hemisférica de um objecto em qualquer comprimento de onda λ , se a sua temperatura T é conhecida, assim como a sua emissividade ϵ_λ nesse dado comprimento de onda.

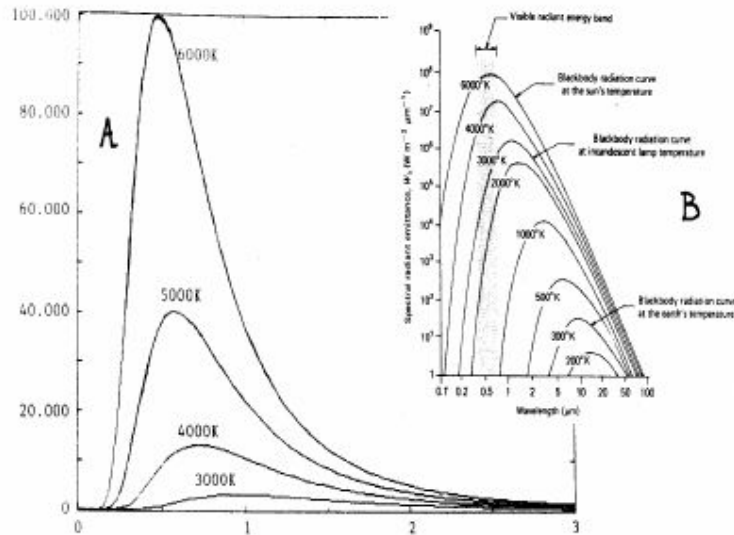


Figura 1.6. Lei de Planck para corpos negros ($\epsilon = \text{constante} = 1$) para diferentes temperaturas (A: Escalas normais, B: escala logarítmica para o c.d.o. e escala normal para a exitância ou emitância). (Fonte: Lillesand & Kiefer, 1994)

Um objecto cuja emissividade se mantém constante em todo o espectro ($\epsilon_\lambda = \epsilon$), é chamado “**corpo cinzento**” ou “**radiador de Planck**”. Um caso especial é o “**corpo negro**”, em que a emissividade é constante e sempre igual a 1. A Figura 1.6 mostra a exitância espectral de corpos negros a diferentes temperaturas de acordo com a lei de Planck. No entanto os radiadores de Planck são excepção. A maioria dos objectos naturais comporta-se como “**radiadores selectivos**” o que significa que a sua emissividade ϵ_λ varia com o comprimento de onda (Figura 1.7).

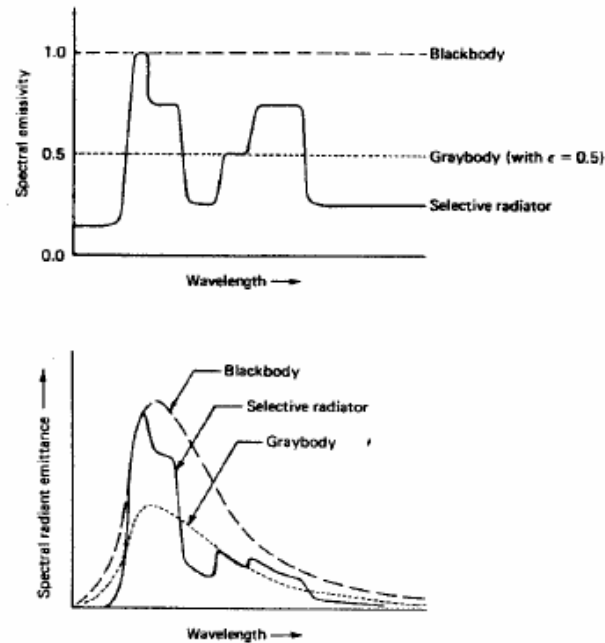


Figura 1.7 - Emissividade espectral ε_λ exitância (ou emitância) M_λ (lei de Planck) para um corpo negro “*Black Body*”, corpo cinzento “*Grey body*” e um emissor radiante selectivo “selective radiator”. (Fonte: Lillesand & Kiefer, 1994)

A utilidade da equação de Planck para os corpos negros ($\varepsilon = 1$) reside no facto de fornecer um limite superior teórico para a radiação térmica de qualquer objecto, dada a sua temperatura. No entanto os materiais reais apenas emitem uma fracção da energia emitida por um corpo negro.

$$\varepsilon_l = \frac{\text{Emitancia Espectral no comprimento de onda de um corpo negro a uma temperatura } T}{\text{Emitancia Espectral no comprimento de onda de um objecto real a uma temperatura } T}$$

Tal como a refletância a emissividade pode variar com o comprimento de onda e o ângulo de observação. Para certos materiais ε_λ também pode depender da temperatura. Muitos materiais irradiam como corpos cinzentos em certos intervalos de comprimento de onda.

A figura 1.8 mostra a exitância espectral do quartzo e da água em comparação com a 26 radiação de um corpo negro. Pode notar-se que o quartzo se comporta como um corpo negro em comprimentos de onda inferiores a $6 \mu\text{m}$, mas como radiador selectivo após esse limite. A água em todo o espectro aproxima-se à definição de corpo negro (ε_λ entre 0,96 e 1,0).

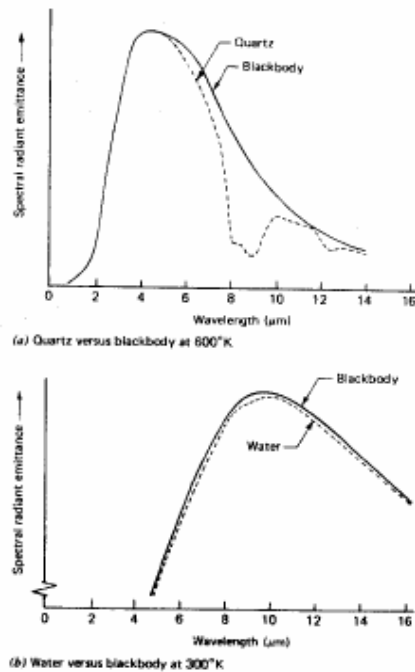


Figura 1.8 - A emitância (ou exitância) espectral do quartzo (a 600 K) e da água (a 300 K), comparada com a do corpo negro. (Fonte: Lillesand & Kiefer, 1994)

A temperatura ambiente da superfície da terra situa-se normalmente próximo dos 300 K (27° C). Segundo a lei de Planck, a radiação da Terra apesar de atingir picos à volta dos 9,7 μm encontra-se mais concentrada na banda dos 8μm a 14μm (IVT). Como consequência, a emissividade só necessita de ser conhecida dentro da banda, enquanto que as eventuais flutuações de ε_λ fora dos limites desta (IVT) são irrelevantes. Muitos objectos naturais (água, neve, solo) aparentam ter uma emissividade que mais ou menos se mantém constante dentro da zona dos infravermelhos térmicos (Quadro 1.3). Nesta banda a maior parte dos materiais comportam-se como 27 corpos cinzentos e a lei de Planck pode ser directamente aplicada para estimar a sua exitância espectral M_λ em função de T e dos valores tabelados de ε .

Teoricamente também pode ser provado que um corpo cinzento absoluto (ε constante) actua sempre como radiador de Lambert. Para corpos cinzentos a radiância (isotrópica ou direccionalmente constante) emitida L_λ , pode ser calculada pela seguinte equação com:

$$L_\lambda = M_\lambda / \pi$$

A figura 1.7 mostra que um aumento de temperatura produz um duplo efeito: a exitância total M_t (que é a área dentro da curva) aumenta correspondentemente, e a radiação desloca-se para a gama dos comprimentos de onda mais curtos. Ambos os efeitos são quantificados pelas duas leis que se seguem, podendo ser directamente derivadas da lei de Planck, mas cuja validade se limita apenas a corpos cinzentos.

A lei de Stefan-Boltzman

A exitância M de uma determinada banda pode ser calculada através da integração espectral da lei de Planck entre limites específicos (λ_1 e λ_2). Na prática tem que ser aplicados métodos numéricos para alcançar este objetivo. Uma solução analítica só é possível para a excitância total. M_t ($\lambda_1=0$, $\lambda_2=\infty$), e se a emissividade permanece constante (corpo cinzento/corpo negro). O resultado é conhecido como a *Lei de Stefan-Boltzman*:

$$M_t = \int_0^\alpha M_\lambda \cdot d\lambda = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4, \quad [\text{W/m}^2]$$

com $\lambda = 5,6697 \times 10^{-8} [\text{W} / \text{m}^2 / \text{K}^4]$, a constante de Boltzman.

A lei de Wien

Igualando a derivada parcial da fórmula de Planck a zero ($\delta M_\lambda / \delta \lambda = 0$), podemos obter a *Lei de Wien*, que relaciona o comprimento de onda $\lambda_{\text{máx}}$ onde a emitância se torna máxima, para uma determinada temperatura do objecto:

$$\lambda_{\text{max}} = 2898000 / T [\text{nm}]$$

A lei de Kirchhoff

A *Lei de Kirchhoff* diz que para qualquer objecto em equilíbrio térmico a emissividade espectral ε_λ deve ser igual à absorvência hemisférica α_λ (ambas no mesmo comprimento de onda):

Para qualquer c.d.o. $\Rightarrow \varepsilon_\lambda = \alpha_\lambda$; Para qualquer banda (λ_1 - λ_2). $\Rightarrow \varepsilon = \alpha$

Por outras palavras, bons absorventes são bons emissores. Frequentemente as superfícies naturais assumem-se como opacas (não transmissoras) para a radiação térmica $\lambda=0$. Utilizando a lei da conservação da energia ($\alpha + \rho + \tau = 1$), vimos que a refletância hemisférica vem como:

Para objectos opacos $\Rightarrow \rho_\lambda = 1 - \alpha_\lambda = 1 - \varepsilon_\lambda [-]$

Devido à sua alta emissividade no IVT (Quadro 1.3) a maioria das superfícies naturais terão uma baixa refletância nessa banda (8-14 μm): $\rho_{\text{IVT}} \leq 10\%$

Quadro 1.3 - Valores de emissividade média (ε) dentro da banda do IVT (8 μm - 14 μm) para alguns materiais comuns.

Material	Temperatura (°C) da amostra analisada	Emissividade (ε)
Pele humana	32	0.98
Água destilada	20	0.96
Gelo	10	0.96
Carbono	20	0.96
Solo molhado	20	0.95
Vidro	20	0.94
Quadro (média de 16 cores)	100	0.94
Tijolo	20	0.93
Solo seco	20	0.92
Asfalto	20	0.92
Emplastro	20	0.91
Areia	20	0.90
Madeira	20	0.90
Neve	10	0.85
Alumínio anodizado	100	0.55
Aço inoxidável lustroso	20	0.16
Ouro excepcionalmente polido	100	0.02

1.4. Interação com a atmosfera e correcção de imagens

A radiação atravessa a atmosfera antes de chegar à superfície terrestre. Neste percurso a radiação e a luz podem ser afectadas pelas partículas e gases presentes na atmosfera. Os efeitos de interação da radiação com a atmosfera são causados pelos mecanismos de dispersão e absorção.

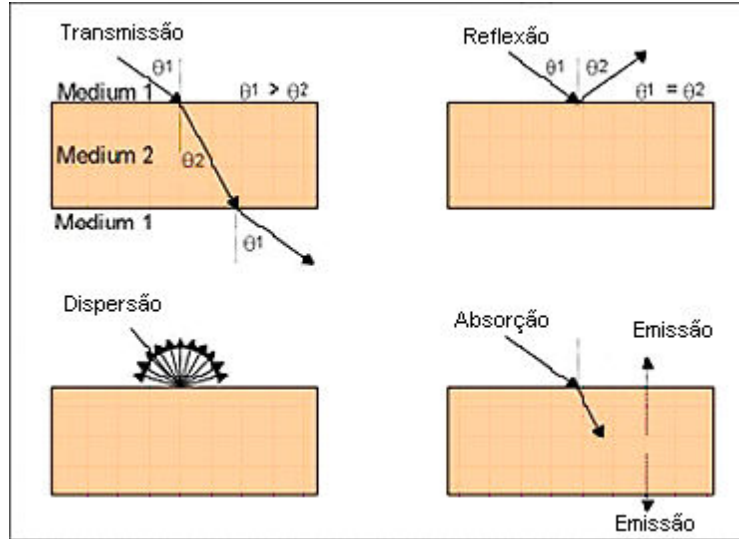


Figura 1.9 – Transmissão, reflexão dispersão, absorção e emissão de uma superfície.

O processo de **dispersão** é resultado das múltiplas reflexões nos constituintes atmosféricos, parte da luz concentrada no raio será dirigida para todas as outras direcções. Este processo não envolve uma atenuação, mas antes uma reorientação dos raios. A ordem de grandeza da dispersão depende de vários factores, incluindo o comprimento de onda da radiação, a abundância de partículas ou gases, e a distância percorrida pela radiação na atmosfera. Existem três tipos diferentes de dispersão.

A **dispersão Rayleigh** ocorre quando as partículas são muito pequenas comparativamente ao comprimento de onda da radiação. Os comprimentos de onda menores são mais afectados por este tipo de dispersão. Quando a luz solar atravessa a atmosfera sofre mais efeitos de dispersão nos comprimentos de onda mais curtos (azul), emitidos em grande quantidade pelo sol. A maior dispersão neste comprimento de onda deve-se à grande quantidade de partículas de pequenas dimensões, dispersando a luz azul em todas as direcções, razão pela qual o céu é azul. Ao nascer e pôr do sol, contudo, a luz tem de viajar maiores distâncias pela atmosfera, e a dispersão dos comprimentos de onda menores é mais completa. A atmosfera actua como um filtro e pouca luz azul chega à superfície terrestre, enquanto a luz vermelha é transmitida e não dispersada chega até nós.

A **dispersão Mie** ocorre quando o diâmetro da partícula é da ordem de grandeza do comprimento de onda da radiação. Este fenómeno ocorre principalmente nas partes inferiores da atmosfera, onde as partículas maiores são mais abundantes, e ocorre especialmente quando existem nuvens.

A **dispersão não seletiva**. Ocorre quando as partículas são muito maiores que o comprimento de onda da radiação. Este tipo de fenómeno pode ser causado por gotas de água e grandes partículas de pó. O termo “não seletivo” resulta aproximadamente do facto de todos os comprimentos de onda serem dispersos de forma quase igual. A cor branca das nuvens deve-se às partículas de água de tamanhos muito maiores que o comprimento de onda da luz ocorrendo dispersão generalizada em todo o espectro visível e iguais quantidades de azul, verde e vermelho se juntam formando o branco.



Figura 1.10 – Dispersão não seletiva. (Fonte: <http://ccrs.nrcan.gc.ca/resource/tutor/fundam/chapter1>)

Absorção: a energia é absorvida, ao contrário do fenómeno de dispersão e é em parte dirigida para certas reacções químicas, e parte para aquecimento. Como resultado da sua temperatura a atmosfera também emite, mas apenas nas ondas longas do IVT.

Transmissão: o que sobrar (se sobrar) da radiação inicial é simplesmente transmitido para a superfície terrestre. A transmissão não é um processo activo, antes significa: ausência de absorção e reflexão.

Em traços gerais, os constituintes atmosféricos podem ser divididos em 4 categorias, com as seguintes características:

- **Ozono (O₃):** este gás é concentrado na camada de Ozono, a cerca de 20 Km de altitude, na estratosfera. Absorve praticamente todas as radiações solares com comprimentos de onda inferiores a 300nm. Este tipo de radiação é perigosa para a vida mas devido ao ozono não atinge a Terra.

- **Vapor de água (H₂O):** O vapor de água absorve radiação em várias bandas do infravermelho próximo, centradas à volta de 720, 810, 940, 1100, 1380, 1870, 2700 e 3200 nm. A importância destas bandas de absorção de água aumenta com o comprimento de onda.

- **Gases moleculares CO₂, NO₂, CO, O₂ e CH₄:** estes gases são uniformemente misturados com a atmosfera e são responsáveis pela chamada reflexão de Rayleigh. Estes processos de reflexão decrescem drasticamente com o comprimento de onda ($\approx 1/\lambda^4$). Então os gases moleculares, reflectem especialmente as ondas mais curtas (UV e azuis), enquanto o seu impacto morre rapidamente no Verde e no Infravermelho próximo.

- **Aerossóis:** aerossóis são dispersões de partícula sólidas ou líquidas no ar. Eles compreendem uma vasta gama de constituintes (nuvens, gotas de água, nevoeiro, fumo, pó, poluição, ...) que causam a reflexão de Mie. Esta difere da acima referida reflexão de Rayleigh pelo seu menor declínio espectral ($\approx 1 / \lambda^{1.3}$), por isso esta continua a ser significativa até ao infravermelho próximo.

1.5. Interação com a superfície terrestre

A radiação que não sofre absorção ou dispersão atmosférica atinge a superfície terrestre e interage com ela. Existem três formas de interação que podem ter lugar, quando a energia **incide** (I) na Terra. São elas a **absorção** (A), **transmissão** (T) e **reflexão** (R). O total de energia incidente interage com a superfície em uma ou mais destas três formas. A proporção de cada uma depende do comprimento de onda da radiação e do material.

$$EI(\lambda) = EA(\lambda) + ET(\lambda) + ER(\lambda),$$

onde $EI(\lambda)$ - Energia incidente

$EA(\lambda)$ - Energia absorvida

$ET(\lambda)$ - Energia transmitida

$ER(\lambda)$ - Energia refletida

A absorção (A) ocorre quando a radiação (energia) é retida pelo objecto, enquanto que a transmissão (T) consiste na passagem da radiação através do objecto. A reflexão (R) ocorre quando a radiação que incide no objecto é “devolvida” pelo objecto, sendo assim redireccionada. A quantidade de energia reflectida que alcança o sensor depende da estrutura da superfície, do ângulo incidente e da refletância da superfície dos objectos (razão entre a energia incidente e a energia reflectida por unidade de superfície).

Os dois tipos principais de como é reflectida a energia são a **reflexão especular** e **reflexão difusa**.

A **reflexão especular** ocorre quando a superfície é lisa, o objecto comporta-se como um espelho, em que toda (ou quase toda) a energia é reflectida com um ângulo idêntico ao de incidência.

Ex.: superfícies que produzem este tipo de reflexão, são águas calmas e alguns tipos de rocha.

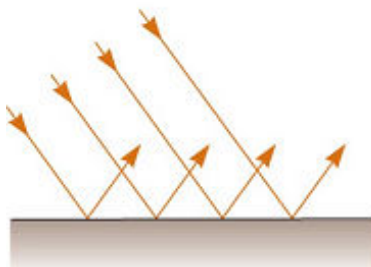


Figura 1.11 – Reflexão especular. (Fonte:

A **refletância difusa** ocorre quando a superfície é irregular, e a energia é reflectida, quase de forma uniforme, em todas as direcções, independentemente do ângulo de incidência.

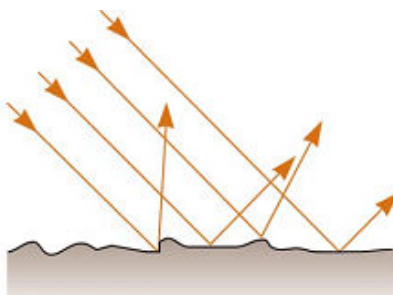


Figura 1.12 – Reflexão difusa

Na prática, a maioria dos objectos naturais dá origem a uma **reflexão mista**. O comportamento espectral da superfície depende assim da sua irregularidade, relativamente ao comprimento de onda da radiação incidente. Se os comprimentos de onda são muito menores do que as variações da superfície, ou do que dimensões das partículas que a constituem, a reflexão difusa domina. Por exemplo, areias com granulometrias reduzidas irão parecer uma superfície razoavelmente lisa para comprimentos de onda elevados nas microondas, mas rugosa para comprimentos de onda no espectro visível.

A reflectividade de um objecto pode ser analisada em função do comprimento de onda, permitindo a construção de um gráfico com as curvas de reflectividade espectral. A informação recolhida por detecção remota tem o conhecimento das características espectrais dos diferentes tipos de materiais que se encontram na superfície terrestre, nomeadamente a vegetação, solos e água.

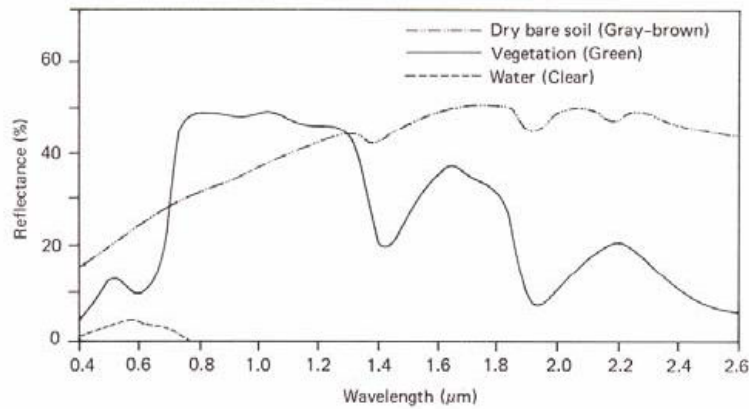


Figura 1.13 – Curvas de refletância espectral típicas da vegetação, solo e água.

1.5.1. Comportamento espectral da vegetação

O comportamento espectral da vegetação varia consoante o tipo de vegetação. Para cada espécie, o comportamento espectral pode ser diferente consoante a estação do ano e a zona geográfica em análise. A reflectividade espectral da vegetação apresenta uma grande variação em função do comprimento de onda. No visível, a maior parte da radiação incidente é absorvida por pigmentos, principalmente de clorofila, nos comprimentos de onda próximos de $0,445 \mu\text{m}$ e também entre $0,6 \mu\text{m}$ e $0,7 \mu\text{m}$. A transmissão de energia é muito reduzida, sendo reflectida quase toda a energia incidente não absorvida, essencialmente no comprimento de onda correspondente ao verde.

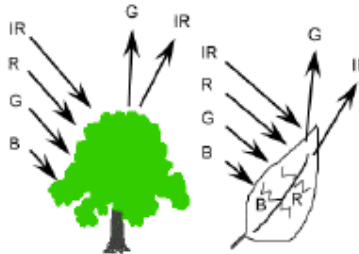


Figura 1.14 – Comportamento espectral das folhas.
(Fonte : <http://ccrs.nrcan.gc.ca/resource/tutor/fundam/chapter1>)

As folhas absorvem pouca radiação no infravermelho próximo (IVP), verificando-se uma subida da reflectividade e transmitância da vegetação verde, entre o visível e o IVP. Esta transição traduz-se pelo aumento bastante significativo da reflectividade devido, principalmente, à estrutura interna das folhas. A diferença abrupta da resposta espectral entre estas duas zonas do espectro, permite concluir que será tanto maior o vigor de uma espécie, quanto maior for o contraste entre estas duas bandas. O IVP revela-se uma banda particularmente útil na discriminação de diferentes tipos de vegetação. Analisando o comportamento espectral no visível e no IVP demonstra o vigor da vegetação.

Na maior partes dos tipos de vegetação, esta região do espectro apresenta valores de refletância de 45 – 50%, transmitância de 45 – 50% e absorvência inferior a 5%.

Na gama do infravermelho médio (IVM), ambos os valores de reflectividade e transmitância são mais baixos do que no IVP, estão sob o controle da estrutura interna da folha e são atenuados pela água dos tecidos foliares, devido à absorção pela água. Através do seu

comportamento espectral nesta região do espectro é possível avaliar o desenvolvimento da vegetação.

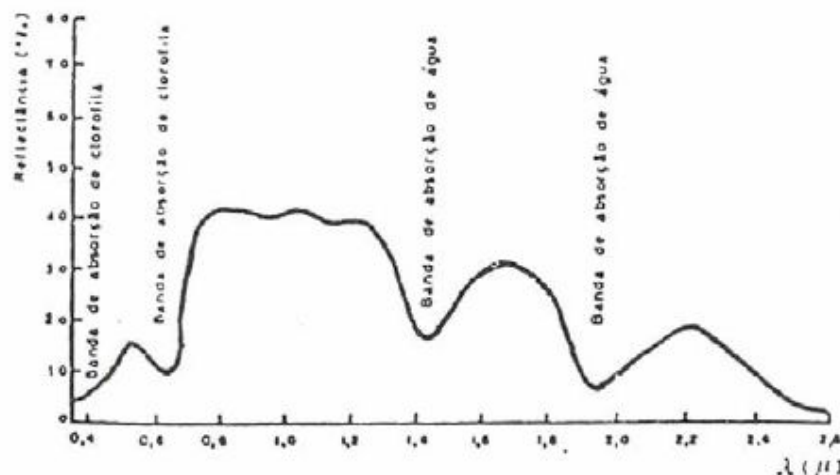


Figura 1.15 – Refletância da folha de uma planta (Orr, 1975)

A folha desempenha um papel fundamental no comportamento espectral da vegetação. No entanto, há estudos que pretendem a caracterização de outros aspectos, tais como: de massas vegetais, altura das plantas, características da forma e tamanho da copa.

Stress hídrico

Quando as plantas perdem água, a concentração dos fluidos internos aumenta, resultando na redução do potencial de água, teor relativo de humidade e turgescência celular da planta. A severidade da perda de água determina o grau de redução dos valores destes parâmetros e, portanto, a extensão das alterações de estrutura da folha.

Tem sido estudada a possibilidade de usar a reflectividade e transmitância das folhas, especialmente no IVM, para detectar o stress hídrico, através dos seus efeitos estruturais. Com a secagem de folhas ao ar, desde a plena turgidez, verificou-se um aumento da reflectividade com o decréscimo do teor total de água.

1.5.2. Comportamento espectral dos solos

A curva espectral dos solos caracteriza-se por uma reflectividade relativamente baixa na região do visível, aumentando gradualmente com o incremento do comprimento de onda das radiações. Trata-se de uma resposta semelhante à da água, mas em sentido contrário. Este comportamento é influenciado pela mineralogia, teor em matéria orgânica, teor em humidade, dimensão das partículas constituintes e rugosidade da superfície.

Um elemento fundamental do padrão de ocorrência espacial dos solos é a presença destes na generalidade da superfície terrestre, de modo que os solos exercem quase sempre alguma influência sobre as propriedades de reflectividade da superfície. No domínio da informação espacial, os objetivos são a caracterização, classificação e cartografia dos solos.

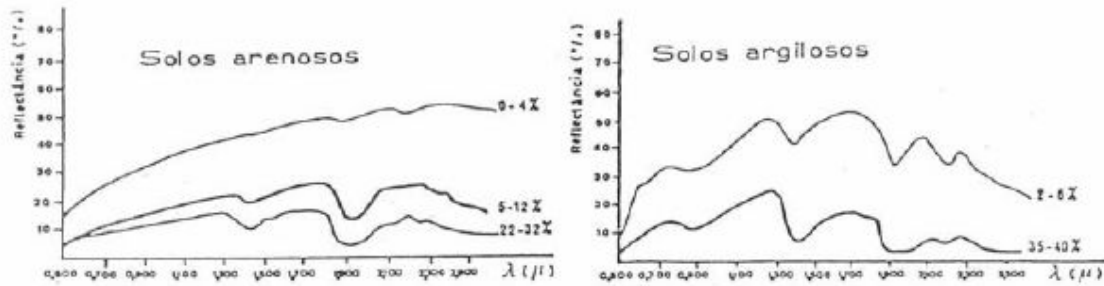


Figura 1.16 - Assinatura espectral dos solos.

A cartografia dos solos coloca especial atenção nas propriedades permanentes dos solos, tais como textura, tipo mineral argiloso dominante, propriedades hidráulicas, etc. No entanto, com as medições repetidas efectuadas pelos satélites, torna-se possível cartografar elementos dinâmicos dos solos.

Do ponto de vista espectral, o comportamento dos solos na região do visível está condicionada principalmente pela presença de matéria orgânica e teor de humidade, pois à medida que estes aumentam, a reflectividade decresce. Em relação ao infravermelho próximo e médio, a resposta espectral pode depender do teor de humidade, como consequência da elevada absorção da água nestas bandas. Na região do infravermelho térmico, normalmente a emissividade de um solo seco é, na maioria dos casos, independente do comprimento de onda, à excepção dos solos muito arenosos. Nestes casos, verifica-se um decréscimo da emissividade, em torno dos $9 \mu\text{m}$, devido à presença de sílica. Nem sempre é fácil adquirir informação sobre os solos a partir da detecção remota, devido à presença de vegetação. Nestes casos, a informação é inferida a partir da cobertura vegetal, já que as espécies vegetais dependem, em larga medida, directamente da natureza dos solos.

O fluxo de radiação incidente no solo é dispersado ou absorvido. A dispersão é função das propriedades geométricas macroscópicas da superfície (forma orientação e tamanho das partículas), enquanto que a absorção é controlada por vários fenómenos físico-químicos microscópicos como vibrações inter moleculares e transmissões electrónicas nos átomos.

As interacções microscópicas entre a radiação eletromagnética e a superfície do solo dão-se aos níveis atómico e molecular e envolvem principalmente processos de absorção. As interacções macroscópicas envolvem os processos de reflexão, absorção, transmissão e refacção por um meio macroscópico.

1.5.3. Comportamento espectral das rochas

O comportamento espectral das rochas está directamente relacionado com os minerais que as constituem. Em regiões áridas ou semi-áridas, em que a vegetação é rara ou praticamente inexistente, os comportamentos espectrais dos minerais são muitas vezes utilizados para inferir a litologia da região em estudo, ao contrário do que sucede em regiões de vegetação abundante. Tal como foi anteriormente exposto para o caso dos solos, é possível detectar diferentes tipos de rocha a partir da vegetação existente, bem como a presença de anomalias geoquímicas. De um modo geral, os minerais argilosos apresentam uma forte absorção em torno dos $1,6 \mu\text{m}$, e consequentemente um decréscimo da reflectividade. Os minerais silicatados e carbonatados absorvem radiações principalmente no domínio do infravermelho médio (em torno dos $2,0$ e $2,5 \mu\text{m}$), ao contrário do quartzo e feldspatos, que não apresentam uma forte absorção, nem na região do visível, nem no domínio dos infravermelhos.

1.5.4. Comportamento espectral da água

Os comprimentos de onda mais curtos da região do visível são reflectidos em maior quantidade comparativamente com os restantes, facto que confere à água a sua cor azul ou esverdeada. Para os comprimentos de onda maiores do visível e do infravermelho próximo há uma maior absorção, sendo praticamente nula a reflectividade a partir do infravermelho próximo. Para comprimentos de onda no vermelho ou infravermelho, a água surgirá com cor negra.

Um factor muito importante na definição das várias tonalidades com que a água pode aparecer quando observada por meios de detecção remota é a existência de sedimentos nas camadas superiores da água. Os sedimentos contribuem para uma reflectância mais elevada e para uma aparência mais luminosa. A cor aparente da água vai sofrer um pequeno deslocamento para comprimentos de onda maiores. A existência de sedimentos pode levar a que essa massa de água seja confundida com águas pouco profundas, mas límpidas. Ainda um factor importante na detecção de água é a existência de algas, cuja clorofila absorve mais azul e reflecte o verde, fazendo com que a aparência da água seja mais verde. Alterações na superfície da água (rugosidade, materiais em suspensão, etc.) são factores que podem também complicar a interpretação da imagem da água, devido aos potenciais problemas da reflexão especular, e outras influências na cor e luminosidade. Há outras substâncias para além dos sólidos inorgânicos em suspensão e clorofila, que afectam a resposta espectral da água. Como exemplo, alguns rios cujas bacias hidrográficas são cobertas predominantemente por florestas, apresentam uma cor castanho-amarelada devido a concentração de taninos (substância adstringente que existe na casca de algumas espécies florestais) libertados por decomposição vegetal. A detecção remota ainda é utilizada para identificar fontes de poluição aquática industrial e derrames de petróleo.

1.6. Sensores activos e passivos

A principal fonte de energia para a detecção remota é o Sol, sendo a sua energia reflectida ou absorvida e reemitida.

Sensores passivos - medem a energia disponível na natureza, ou seja apenas são utilizados quando existe luz emitida pelo Sol disponível.

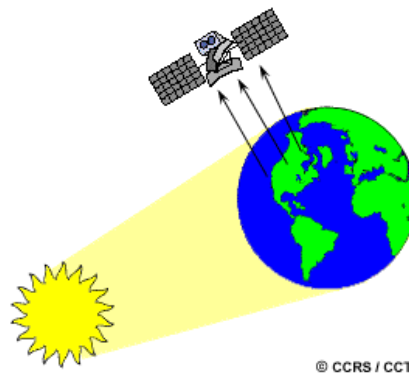


Figura 1.17 - Sensores passivos.

(Fonte: <http://ccrs.nrcan.gc.ca/resource/tutor/fundam/chapter1>)

Sensores activos – dispõem da sua própria fonte de energia. O sensor emite radiação que é dirigida para o objecto a estudar, sendo posteriormente reflectida e registada pelo sensor. A grande vantagem destes sensores é poder obter registos em qualquer altura, não dependendo da altura do dia nem da estação do ano.

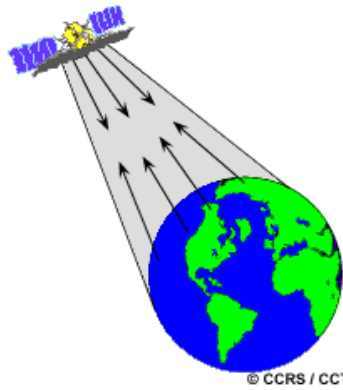


Figura 1.18- Sensores activos.

(Fonte: <http://ccrs.nrcan.gc.ca/resource/tutor/fundam/chapter1>)

II. Características das imagens

2.1. O conceito de resolução

Cada sistema de deteção remota tem quatro resoluções associadas. O termo resolução pode-se definir como uma medida de capacidade do sistema óptico para distinguir sinais de proximidade espacial e similaridade espectral.

A resolução angular corresponde ao ângulo plano de abertura ou campo instantâneo de visão ((*Instantaneous Field of View –IFOV*) do sistema (incluindo a amplificação óptica através de lentes ou espelhos). A resolução espacial corresponde à dimensão da célula do terreno A_t ou pixel (para um sistema de imagem através de scanner). O valor de A_t é determinado pela abertura do ângulo (resolução angular) e pela distância H entre o sensor e o alvo. A resolução espacial (ou simplesmente resolução) é muito importante para satélites de imagem, indicando a dimensão do pixel. Apesar de muito raramente estar incluído na lista de resoluções, o poder sinóptico é um importante critério para julgar os satélites de imagem, representa a dimensão física da região visionada, e pode ser quantificada pela largura da faixa de varrimento, Sw (*Swath width*).

A resolução radiométrica relata a precisão e a fiabilidade das medidas ópticas. É basicamente determinada pela razão Sinal / Ruído e a resolução do ADC. A resolução temporal representa a periodicidade com que a mesma região é visionada e registada.

2.2.1. Resolução espectral

A resolução espectral passa pela extensão das bandas espectrais usadas: quanto mais estreita for a banda melhor a resolução espectral. Elevada resolução espacial corresponde ao uso de numerosas bandas estreitas, que representam uma amostragem mais densa da função contínua da refletância de um alvo. Deste modo consegue-se produzir uma assinatura espectral mais rigorosa de objectos discretos do que recorrendo a bandas mais largas.

Para sistemas multiespectrais o mesmo conceito é também usado para mostrar o número de bandas espectrais por exemplo, com as suas 7 bandas o satélite LANDSAT TM tem melhor resolução espectral do que o satélite SPOT HRV com as suas 3 bandas.

2.1.2. Resolução espacial

De forma simplificada, a resolução espacial refere-se à área de terreno observada por um radiómetro, em cada instante e define a distância mínima entre dois objectos que um sensor consegue registar distintamente. A distância entre o alvo e o sensor tem um papel importante na determinação do detalhe da informação obtida. A resolução espacial dos sensores passivos depende principalmente do seu campo de visão instantânea (IFOV). O IFOV é determinado pelo seu sistema óptico e dimensão do elemento detector, e exprime-se como o cone angular de visibilidade de um sensor no interior do qual a energia incidente converge sobre o detector.

A área visualizada é determinada multiplicando o IFOV pela distância do sensor à superfície. Esta área é denominada célula de resolução, e determina a resolução espacial máxima de um sensor (Figura 2.1). Na imagem assim obtida a célula de resolução toma o nome de pixel (*picture element*).

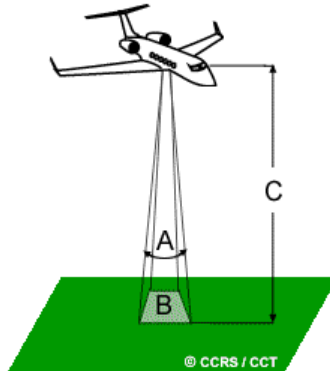


Figura 2.1 – Campo de visão Instantânea (IFOV).

(Fonte: <http://ccrs.nrcan.gc.ca/resource/tutor/fundam/chapter2>)

Para que um objecto seja detectado, a sua dimensão tem de ser, normalmente, igual ou superior à da célula de resolução. Se o objecto é menor, pode não ser detectável, já que a luminosidade de todos os objectos que se podem encontrar nessa célula serão registados. No entanto, um valor de IFOV não é sempre um indicador verdadeiro da dimensão do menor objecto detectável. Um objecto que contraste fortemente com tudo o que o rodeia, ou seja que a sua refletância domine dentro de uma célula, podendo ser mais claro ou mais escuro, pode modificar a radiação global da célula de resolução de modo a tornar-se detectável. Por exemplo, é possível detectar fontes de altas temperaturas, de origem industrial (refinarias, petróleo, siderurgias, etc.) ou mesmo incêndios florestais, cobrindo áreas de aproximadamente 100 m^2 com recurso ao sensor AVHRR do satélite NOAA, que tem uma célula de resolução de $1,1 \text{ km}^2$. Este facto é possível devido ao forte contraste térmico entre uma pequena parte do pixel e o resto da área deste.

2.1.3. Resolução temporal

A resolução temporal de um sistema de detecção remota consiste no período de tempo decorrido entre duas observações consecutivas do mesmo local, ou seja o tempo que um satélite leva a completar um ciclo orbital completo.

A cobertura da área da superfície terrestre correspondente às órbitas adjacentes do satélite quase sempre tem alguns graus de sobreposição e com o aumento da sobreposição com o aumento da latitude, algumas áreas da superfície terrestre tendem a ter coberturas mais frequentes.

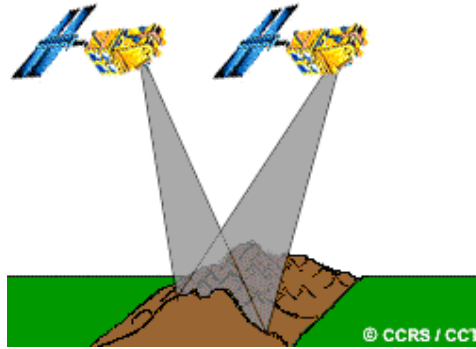


Figura 2.2 – Observações do mesmo local na superfície terrestre pelo mesmo sensor em dias diferentes ou por diferentes sensores.

A resolução temporal de um determinado satélite é um factor muito importante para certas aplicações da detecção remota. Alterações das características espectrais de objectos ao longo do tempo podem ser detectadas obtendo e comparando imagens multitemporais, ou seja imagens de datas diferentes. Por exemplo, estudos da fenologia da vegetação terrestre, variações de temperatura das correntes oceânicas, ou mesmo acidentes como incêndios florestais e derrames de petróleo. A duração dos períodos de estudo pode ser sazonal, ou de apenas alguns dias ou horas mas, em qualquer caso a dimensão temporal pode constituir um discriminante essencial no estudo destes objectos ou processos.

Um dos principais objectos de detecção remota é a monitorização de alterações das paisagens, a resolução temporal é uma consideração importante no num sistema de detecção remota. São especialmente importantes os compromissos entre as outras três dimensões da resolução, que têm levado à construção de sistemas com frequências temporais de cobertura bastante diversas e que se adequam a diferentes tipos de aplicação.

2.1.4. Resolução radiométrica

A resolução radiométrica descreve a sua capacidade para discriminar pequenas variações de energia, ou seja, é o número de níveis distintos, ou discretos, em que um sinal pode ser dividido. Quanto mais elevada a resolução radiométrica de um sensor, mais sensível é esse sensor na detecção de pequenas diferenças de energia reflectida ou emitida.

Em termos de imagem, que é apresentada em formato digital, a resolução radiométrica é o número de tons de cinzento discerníveis entre o preto e o branco, correspondentes aos casos extremos. Uma imagem é constituída por números positivos, que variam entre 0 e uma potência de 2. A amplitude destes valores corresponde ao número de *bits* utilizados para a codificação de números em formato binário. Cada *bit* regista um expoente de base 2 (por exemplo, 1 *bit* = $2^1 = 2$). O número máximo de níveis digitais disponíveis depende do número de *bits* usados na representação da energia registada. Assim, se um sensor usa 8 *bits* para registar informação, estarão disponíveis $2^8 = 256$ níveis digitais, que variam de 0 a 255. Contudo, se apenas são usados 4 *bits*, então estarão disponíveis só $2^4 = 16$ níveis, que variam de 0 a 15, sendo a resolução radiométrica muito menor.

III. Sistemas de Detecção Remota

3.1. Plataformas e suas características

As plataformas são a base estável que servem de suporte aos sensores que registam a energia reflectida e emitida pela superfície terrestre.

Há dois tipos de plataformas:

- a) as terrestres, onde os sensores de observação da superfície estão relativamente perto do objecto em observação, e podem estar colocados em guias andaimos, etc.
- b) as aéreas, que são normalmente aviões. Os sensores colocados em aviões são usados para recolher imagens sobre determinada área da superfície terrestre. Para outro tipo de observação temos as imagens recolhidas por meio de detecção remota, onde os sensores são colocados em plataformas que usualmente são designadas por satélites, estes lançados pelo homem e que circulam segundo uma órbita no espaço, permitindo a cobertura sucessiva da superfície terrestre. Os satélites têm características únicas que nos permitem a observação da superfície terrestre através dos dados obtidos por meio de detecção remota.

3.2. Componentes do satélite

Um satélite (artificial) é um instrumento que faz um movimento orbital à volta da Terra. Aqui segue uma lista dos componentes mais importantes de um satélite utilizado para detecção remota:

- A plataforma é a superfície onde todos os outros utilitários estão assentes.
- Os painéis solares interceptam a energia solar necessária para alimentar os sistemas electrónicos (sensores, gravadores, antenas, ...).
- As antenas de transmissão enviam dados registados para as estações terrestres (eventualmente via um satélite de telecomunicações). Em oposição, o satélite pode ser parcialmente programado da Terra através de antenas de recepção.
- O sistema de registo (sensor) forma o coração da carga.
- Satélites quase-polares contêm muitas vezes gravadores magnéticos para armazenamento temporário de dados aquando da passagem do satélite sobre regiões sem estações de recepção terrestres.
- Passado algum tempo a plataforma (ou satélite) começa a desviar-se da órbita desejada. Através da reacção de um motor e do seu respectivo tanque de combustível (hidrazina) poderão ser feitas correcções na órbita. A vida média de um satélite de observação da Terra situa-se geralmente entre os quatro e os sete anos.

3.3. Órbitas dos satélites

3.3.1. Órbitas circulares e elípticas

Para fins militares e de espionagem, uma região hostil tem que ser visualizada com grande detalhe (com pixels de 1m x 1m ou mesmo menos). Além do uso de lentes enormes (muito caras para aplicações civis), esta resolução espacial elevada pode ser conseguida se o satélite for colocado numa órbita elíptica, sendo a Terra um dos pontos focais. O satélite aproxima-se bastante da zona de análise (curta distância, alta resolução), enquanto que no lugar oposto da Terra ele atinge uma distância bastante grande (baixa resolução). Neste caso a resolução espacial varia com a posição geográfica, órbitas não circulares não são aceitáveis para a contínua observação da superfície da Terra. Por esta razão os satélites de detecção remota civis são colocados de uma maneira geral em órbitas circulares com um raio fixo e como tal com uma resolução também fixa.

Órbitas circulares e seus parâmetros

A aceleração normal ou centrípeta, a_n , requerida para manter o movimento circular uniforme (com uma velocidade angular constante Ω) é providenciada pela atracção gravitacional da terra sobre o satélite. Da mecânica clássica temos:

$$a_n = V^2/R = R\Omega^2 = g = (G.M)/R^2 \text{ (m.s}^{-2}\text{)}$$

onde:

G - constante gravitacional ($G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3/\text{Kg.s}^2$)

M - massa da Terra ($M = 5,98 \cdot 10^{24} \text{ Kg}$)

R - distância do satélite ao centro da Terra

Ω - velocidade angular constante (rad/s)

$V = R.\Omega$ = velocidade linear constante (m/s)

A equação anterior dá origem imediatamente às seguintes fórmulas para a órbita circular:

Velocidade angular: $\Omega = (G.M / R^3)^{1/2}$ (rad/s)

Velocidade linear: $V = R.\Omega = (G.M / R)^{1/2}$ (m/s)

Período: $T = (2\pi.R) / V = 2\pi / \Omega = 2\pi.(R^3 / G.M)^{1/2}$ (s/órbita)

Frequência: $f = 1 / T = \Omega / 2\pi = (G.M/R^3)^{1/2} / 2\pi$ (órbital/s)

Raio: $R = (G.M.T^2 / 4\pi^2)^{1/3}$ (m)

Nota: A altura H a que o satélite está acima da superfície da Terra iguala $H = R - R_{\text{Terra}}$ com $R_{\text{Terra}} = 6370 \text{ Km}$

A equação anterior mostra que os parâmetros da órbita estão estritamente interrelacionados. Por exemplo a escolha de um determinado raio R (ou altura H) determina completamente a velocidade e o período da órbita.

Um segundo aspecto da mecânica das orbitas, para além da velocidade e do período, diz respeito à orientação da orbita. Desta forma, a inclinação i representa o ângulo entre o plano orbital e o plano definido pelo equador da Terra. Um satélite equatorial ($i=0^\circ$) coloca-se sempre sobre o plano do equador, enquanto que um satélite polar ($i = 90^\circ$) passa exactamente sobre os pólos. Os pontos de intersecção entre os dois planos são chamados de nós (e são sempre dois, a não ser que $i = 0^\circ$).

3.3.2. Satélites geostacionários

Enquanto que o satélite descreve a sua órbita à volta da terra, esta roda em torno do seu eixo com um período de 1 dia ($T=86400\text{s}$). Um satélite é chamado geosincronizado ou geostacionário se o seu período orbital iguala o período de rotação da Terra.

Satélites geosincronizados com uma inclinação diferente de 0° são excepcionais. Em regra as órbitas geosincronizadas são combinadas com uma inclinação de 0° . Tais satélites movem-se em fases com a rotação da terra ficando fixas acima de certo local no equador. Para um observador na terra até parece que os satélites geostacionários não têm nenhum movimento orbital de todo. Desta maneira, a plataforma europeia METEOSAT está fixa acima de um ponto com $\text{LAT}=0^\circ$ (equador) e $\text{LON}=0^\circ$ (meridiano de Greenwich). A uma distância de 36.000 Km, a parte exposta do globo (África, Médio Oriente e Europa) é sistematicamente visionada a cada 30 minutos. A enorme distância resulta numa baixa resolução espacial (pixels de 2,5 Km x 2,5 Km). Para além do METEOSAT europeu existem mais 4 satélites geostacionários semelhantes, mantidos por outros países (os Estados Unidos mantêm o GOES-Oriente e o GOES-Occidente, o Japão mantém 1 satélite e a Rússia o outro). Estes 5 satélites estão posicionados em cima do equador em intervalos mais ou menos iguais de 72° ($360^\circ/5$), estas 5 plataformas monitorizam continuamente a superfície da terra (com excepção dos pólos propriamente ditos). A rede de satélites é coordenada pela Organização Mundial de Meteorologia. Os dados são geralmente combinados com os dados do NOAA (mais detalhado) para aplicações em Meteorologia e Climatologia.

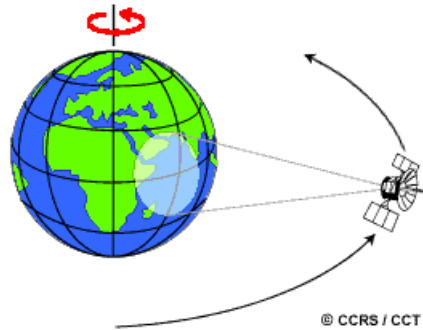


Figura 3.1 – Satélite com órbita geoestacionária.
(Fonte: <http://ccrs.nrcan.gc.ca/resource/tutor/fundam/chapter2>)

3.3.3. Satélites quase-polares

A maior parte dos outros satélites de observação da terra deslocam-se numa órbita circular quase-polar com uma inclinação i de 99° (Figura 3.2).

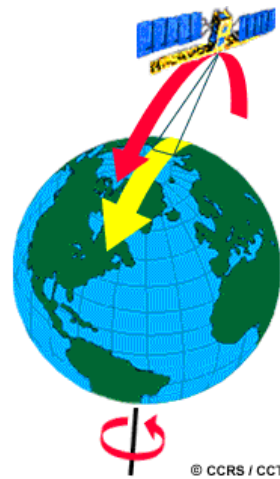


Figura 3.2 - Satélite com órbita quase-polar.
(Fonte: <http://ccrs.nrcan.gc.ca/resource/tutor/fundam/chapter2>)

A altura orbital H é geralmente seleccionada entre 500 e 1000 Km, que traz as seguintes três consequências:

- O satélite já não é geosincronizado: dependendo da altura H , realiza aproximadamente 14 órbitas por dia.
- Devido às órbitas baixas, a resolução espacial é bastante melhor. O preço a pagar por esta resolução é ter um poder sinóptico inferior.
- Cada órbita compreende uma fase descendente (do pólo norte para o pólo sul) e uma fase ascendente (do pólo sul para o pólo norte). De uma forma geral (pelo menos para o NOAA, LANDSAT e SPOT), a parte iluminada da terra é feita na fase descendente e a parte escura na fase ascendente. O registo de imagens na zona reflectiva das ondas curtas (300 - 3000 nm) requer a presença do sol e por isso é restringida à fase descendente. No lado escuro o registo continua mas as imagens completamente pretas não são captadas pelas estações de recepção terrestre. Contudo, no IVT e no domínio das microondas o registo de imagens pode também continuar na fase ascendente nocturna.

As consequências da inclinação quase-polar ($i=99^\circ$) são duas:

- a) As linhas de passagem do satélite (*track*) são a projecção perpendicular da órbita na superfície da terra. Estas linhas assumem uma forma em S (quando projectadas num mapa mundo com projecção de MERCATOR). Esta forma das linhas de passagem deve-se

parcialmente à não polaridade (obliquidade) da órbita e parcialmente ao facto de que a terra roda por baixo do satélite de Oeste para Este.

b) A não polaridade ($i=90^\circ$) é necessária para que se possa obter uma órbita heliosincronizada. Como resultado da não polaridade é gerado um momento impulsionador que força o plano orbital a rodar com o mesmo ângulo por um período de um ano (o que compensa a rotação da terra à volta do Sol). A heliosincronização garante então que o satélite cruza sempre um local sobre a terra à mesma hora. O tempo de passagem varia com a latitude, por exemplo na sua passagem do pólo norte para o pólo sul. Devido a esta sincronização, imagens subsequentes da mesma região poderão pelo menos ser comparadas (ex: em zonas montanhosas a sombra estará sempre na mesma direcção).

3.4. Sensores e suas características

3.4.1. Sensores ópticos multiespectrais

Os sensores ópticos registam informação radiométrica relativamente às regiões do visível e do infravermelho. Podem ser classificados consoante o seu sistema de varrimento:

- **Sensor de varrimento mecânico perpendicular à trajectória** – o sensor tem um espelho oscilante de varrimento (ex. TM e ETM+ do satélite Landsat) que envia a radiação incidente, através do sistema óptico, para um outro conjunto de espelhos oscilantes designados por “correctores da linha de varrimento”. Este sensor faz a leitura linha a linha, ao longo da trajectória, de um lado do sensor até ao outro, através de um espelho oscilante (A). O campo de visão do sensor (IFOV) (C) e a sua altitude determinam a resolução espacial do pixel (D) e a largura da faixa coberta pelo sensor (F) depende do ângulo de oscilação do espelho (E). Os ângulos de oscilação do espelho normalmente variam entre 90° a 120° , no entanto para alguns satélites com elevada altitude o ângulo é muito reduzido (10° a 20°) para cobrir uma área na superfície terrestre com resolução espacial grosseira. A distância do sensor à superfície terrestre aumenta consoante se afasta do nadir, introduzindo distorções geométricas nas imagens.

O conjunto de detectores (B), registam a energia para cada banda, ou seja para diferentes intervalos de comprimento de onda.

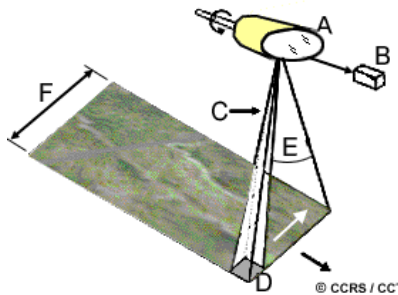


Figura 3.3. Scanner de varrimento mecânico.

(Fonte: <http://ccrs.nrcan.gc.ca/resource/tutor/fundam/chapter2>)

- **Sensores de varrimento ao longo da trajectória ou matriz linear**, também designados por *Charge Coupled Device* (CCD) – com um conjunto de sensores em linha (ex. sensor HRV do SPOT, sensores dos satélites IRS, IKONOS e QuickBird). Este tipo de sensor usa uma série linear de detectores que são deslocados ao longo da trajectória. Cada detector mede a energia da área de um pixel, que é determinada pelo tamanho do campo de visão. Para cada banda é necessário uma série linear de detectores a registar a energia para os respectivos intervalos de comprimentos de onda. Estes sensores apresentam vantagens relativamente aos primeiros. Normalmente são detectores mais pequenos e mais leves logo necessitando de menor energia, constituídos por dispositivos microelectrónicos. Cada um dos detectores mede a energia de cada área do solo durante mais tempo, não

necessitando de se deslocar ao longo da largura da faixa de leitura, permitindo assim uma melhor resolução radiométrica com o aumento da energia detectada. Estas características também são mais adequadas a melhores resoluções espaciais e espectrais.

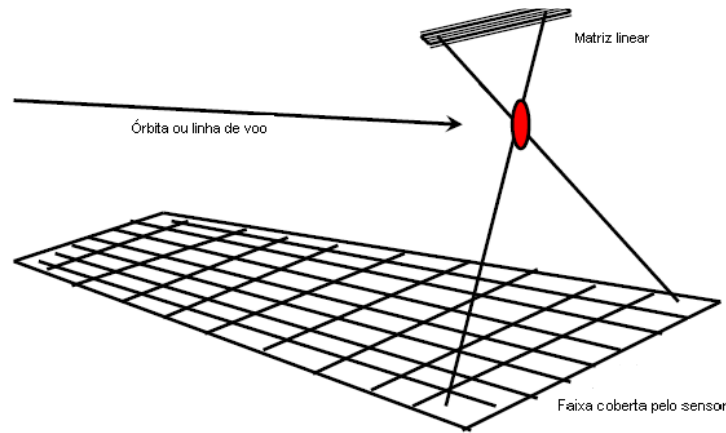


Figura 3.4 – Sensor com matriz de linear de varrimento.

3.4.2. Sensores térmicos

A detecção remota de energia emitida da superfície terrestre no espaço do IVT é diferente da detecção da energia reflectida. Os sensores térmicos detectam a radiação no infravermelho térmico, através de detectores sensíveis ao contacto directo com fótons emitidos pela radiação térmica. Estes sensores são arrefecidos para temperaturas próximas de 0° de modo a limitar as suas próprias emissões térmicas e medem assim a temperatura à superfície e as propriedades térmicas dos alvos.

Os sensores térmicos, no geral, são sensores de varrimento perpendicular à trajectória, que detectam apenas a radiação no infravermelho térmico. A temperatura de radiação detectada é comparada com temperaturas de referência interna destes sensores, de modo a serem relacionados com a temperatura de radiância absoluta.

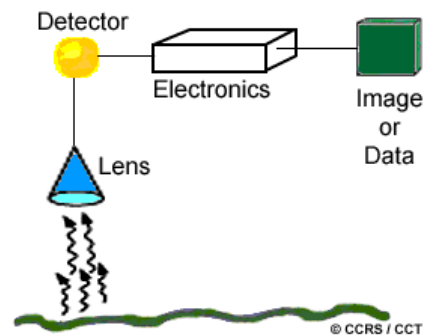


Figura 3.5 - Sensor térmico.

(Fonte: <http://ccrs.nrcan.gc.ca/resource/tutor/fundam/chapter2/>)

3.4.3. Sensores hiperespectrais

Os sensores hiperespectrais produzem imagens multiespectrais em várias bandas espectrais contíguas de pequena amplitude, no visível e infravermelho próximo e médio. Os sensores hiperespectrais são caracterizados pela alta resolução espectral contígua numa gama vasta do espectro eletromagnético. Tendo em conta os últimos desenvolvimentos nos radiómetros, de alta resolução espectral com uma razão sinal/ruído elevada, os sensores hiperespectrais podem gerar imagens de alta qualidade muito para além dos sensores multiespectrais actuais. O sensor *HymapTM*, a gama espectral abrange desde o visível até ao infravermelho próximo (0,45-2,5 μm), num total de 126 bandas, com a extensão espectral de cada uma variando entre 0,01 e 0,02 μm .

Estes sensores tem como finalidade, permitir a discriminação entre objectos, que apresentam absorções e refletâncias características em intervalos muito estreitos de comprimento de onda.

Uma grande parte das suas aplicações recai na caracterização da composição mineralógica e/ou química da superfície terrestre.

3.4.4. Microondas

Estes sensores, também designa por RADAR (*RADio Detection And Ranging*), registam a informação radiométrica no campo das microondas (desde 1cm até 1 m), mostrando algumas vantagens relativamente aos sensores ópticos. Devido a uma importante janela atmosférica, as microondas não interferem com a atmosfera chegando a penetrar em nuvens bastante densas (figura 3.6).

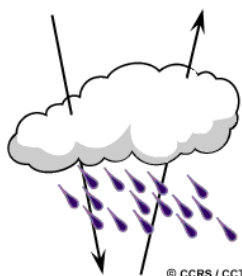


Figura 3.6 - Microondas a penetrar nas nuvens densas.

Em oposição aos sistemas de ondas curtas, não existe diferença entre a resolução temporal potencial e a real. Estes sensores ao invés dos *scanners* passivos que registam a luz do sol reflectida ou radiação emitida pela terra, tem luz própria senso assim um sistema activo. O satélite contém a sua fonte própria de RADAR, que emite microondas para a terra com uma certa duração e através da antena do sensor que capta a informação sobre o tempo de resposta (distância) e a intensidade do sinal reflectido pela superfície. Neste tipo de imagens (radar) existem alguns ruídos que dificultam a interpretação. Como os princípios físicos são completamente diferentes do domínio da onda curta, as imagens de microondas não serão tratadas neste texto. As discussões anteriores apontam para uma forte interacção negativa entre os critérios desejáveis para um bom desempenho do sistema: cada melhoramento de um determinado nível é compensado pela perda em outro nível. A razão é a seguinte: para garantir uma medição com uma precisão adequada, a energia proveniente do pixel do terreno e que atinge o sensor, deverá ser sempre suficientemente grande para ultrapassar o ruído do sensor (razão entre o sinal e o ruído)

- A interacção entre resolução espectral e resolução espacial aparece claramente nos dois modos de registo do SPOT-HRV: a dimensão do pixel do modo Pancromático (PAN) pode apenas ser reduzido para 10 m x 10 m (menor IFOV = menos energia no sensor) aumentando a largura de banda (1 banda pancromática relativamente larga de 400 nm). Outro exemplo é a banda térmica (8 μm -14 μm) do LANDSAT-TM. Para compensar os baixos fluxos energéticos nesta parte do espectro (ver lei de Planck com $T = 330\text{K}$), esta banda térmica terá que ter

pixels no terreno muito mais largos (120 m x 120 m) do que aqueles das 6 bandas (TM) de comprimento de onda curto (30 m x 30 m).

- Uma resolução espacial elevada envolve sempre uma perda do poder sinóptico. Desta forma, todos os sistemas mencionados no quadro 3.1 podem desempenhar um papel importante dependendo da escala onde se pretende trabalhar: Mundial (series-METEOSAT), continental (NOAA), nacional (MSS) ou regional (TM-SPOT).

- Obviamente, a memória do computador requerida para guardar uma imagem de uma certa área, aumenta exponencialmente com o decrescente tamanho dos pixels. O quadro 3.1 mostra a tremenda capacidade de armazenamento que as estações terrestres de recepção têm que ter mas também para o simples utilizador.

Algumas vantagens das imagens Radar:

- Devido ao elevado comprimento de onda, a interacção da radiação com as nuvens ou precipitação é reduzida ou mesmo anulada (maiores c.d.o.).
- A informação fornecida por imagens de radar é distinta da informação obtida na gama do visível, infravermelho e térmico. Enquanto a reflectividade no visível e infravermelho está relacionada com as propriedades moleculares dos objectos, as imagens de radar dependem de características macroscópicas da superfície: rugosidade e volume (por exemplo, das copas).
- Imagens de radar têm boa resolução espacial, são obtidas para quaisquer condições meteorológicas, de dia ou de noite, e independentemente das condições de iluminação.
- Essas características fazem com que as imagens de radar sejam de grande utilidade para a monitorização da superfície em áreas com grande nebulosidade como as regiões temperadas e as regiões equatoriais.

Principais áreas de aplicações de imagens radar

- Altimetria e topografia;
- Agricultura: monitorização de culturas, estimativas de produção;
- Controlo de tráfego marítimo e de poluição marítima (exemplo: Prestige);
- Aplicações militares: reconhecimento, vigilância;
- Produção de cartas temáticas: geológicas, uso do solo;
- Cartografia de zonas húmidas;
- Gelos nos oceanos: deteção de icebergs, monitorização das superfícies geladas.

3.5. Aplicações e características dos satélites e respectivos sensores ópticos

3.5.1. Satélites para observação da superfície da Terra

Landsat

O programa Landsat recua a 1967, quando a *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) iniciou o estudo conceptual da viabilidade de uma série de satélites para a observação de recursos terrestres, designada por *Earth Resources Technology Satellites* (ERTS). O satélite ERTS-1 foi lançado em 1972 e manteve-se em funcionamento até 1978. Pouco antes do lançamento do segundo aparelho desta série, a NASA alterou a designação do programa para Landsat e o ERTS-1 ficou com o nome Landsat 1. O Landsat foi concebido para recolha de dados multiespectrais da superfície terrestre a partir de uma plataforma espacial não tripulada. Este programa foi um sucesso, e desde então recolheu abundantes dados de todo o planeta a partir de vários satélites Landsat.

Os primeiros 3 satélites Landsat levavam a bordo o sensor Multiespectral Scanner (MSS) com quatro bandas espectrais, com uma adicional presente no satélite Landsat 3, lançado a 5 de Março de 1978. A resolução temporal destes satélites era de 18 dias com uma altitude de aproximadamente 900 km.



Figura 3.7 - Landsat 3. (Fonte: <http://landsat.gsfc.nasa.gov>)

O Landsat 4 e 5, lançados, respectivamente em 16 de Julho de 1982 e 1 de Março de 1984, levavam a bordo dois sensores, o MSS presente nos Landsat 1-3 e, adicionalmente, um outro sensor multiespectral melhorado, o *Thematic Mapper* (TM).

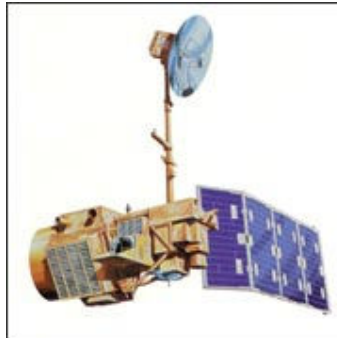


Figura 3.8 - Landsat 5. (Fonte: <http://landsat.gsfc.nasa.gov>)

As bandas disponíveis no Landsat 1 - 3 estavam numeradas de 4 a 7 e foram re-numeradas de 1 a 4 nos Landsat 4 – 5 (Quadro 2.1). A resolução espacial do pixels é de 68 m, que corresponde a uma área no terreno de 68 m por 83 m no nadir.

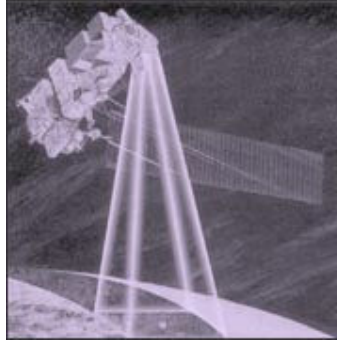
Quadro 3.1- Bandas do sensor MSS.

Bandas		Comprimentos de onda (μm)	Resolução espectral
Landsat 1,2,3	Landsat 4,5		
MSS 4	MSS 1	0,5 – 0,6	68 m (68 m x 83 m)
MSS 5	MSS 2	0,6 – 0,7	68 m (68 m x 83 m)
MSS 6	MSS 3	0,7 – 0,8	68 m (68 m x 83 m)
MSS 7	MSS 4	0,8 – 1,1	68 m (68 m x 83 m)

O Landsat 6 foi lançado em Outubro de 1993, tendo-se perdido e nunca chegando a atingir órbita. Este satélite apresentava um sensor com características diferentes, com melhorias relativamente ao TM, designado por ETM (*Enhanced Thematic Mapper*), uma vez que, para além dos canais já existentes, possuía um canal pancromático, designado por PAN, que operava entre 0,50 μm e os 0,90 μm , com uma resolução de 15 m.

Quadro 3.2 - Características espectrais e espaciais do sensor TM.

Sensor	Bandas	Comprimentos de onda (μm)	Resolução espacial
TM	1	0,45 – 0,52	30 m
	2	0,52 – 0,60	30 m
	3	0,63 – 0,69	30 m
	4	0,76 – 0,90	30 m
	5	1,55 – 1,75	30 m
	6	10,4 – 12,50	120 m
	7	2,08 – 2,35	30 m

Figura 3.9 - Landsat 6. (Fonte: <http://landsat.gsfc.nasa.gov>).

O Landsat 7, é o mais recente satélite em operação do programa Landsat, foi lançado a 15 de Abril de 1999, com um novo sensor, o *Enhanced Thematic Mapper Plus* (ETM+), assim designado por conter mais uma banda pancromática com resolução espacial de 15 m. A órbita deste satélite tem uma altitude de 705 km. A operação do satélite em órbita é administrada pela NASA e sua produção e comercialização de imagens fica sob os cuidados da USGS (*United States Geological Survey*). A sua vida útil está prevista para ser superior a 5 anos em órbita. Este sensor, ETM+, contém algumas melhorias relativamente ao TM, permite obter imagens compostas de 8 bandas espectrais, com a uma banda pancromática registada com as restantes bandas, melhorias nas características geométricas e radiométricas, e o aumento da resolução espacial da banda térmica para 60 m. As bandas do visível e do infravermelho mantiveram a resolução espacial de 30 m do Landsat 5 (canais 1,2,3,4,5 e 7). A recolha dos dados do landsat 7 está orientada segundo o *World Wide Reference System 2* (WRS-2), que catalogou a superfície terrestre em faixas de 183 km de largura e em imagens com comprimento de 170 km (Figura 3.11).

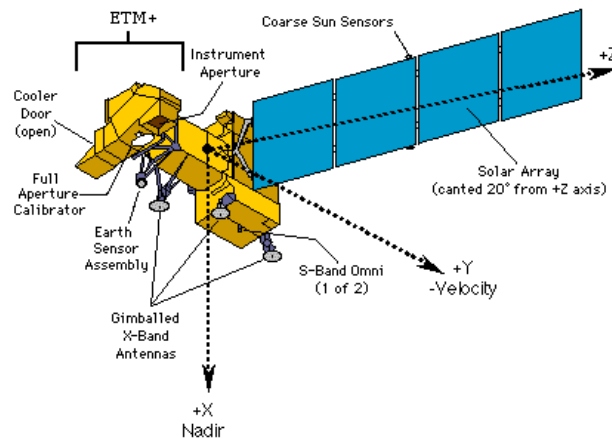


Figura 3.10 - Landsat 7.

(Fonte: http://ltpwww.gsfc.nasa.gov/IAS/handbook/handbook_htmls/chapter2).

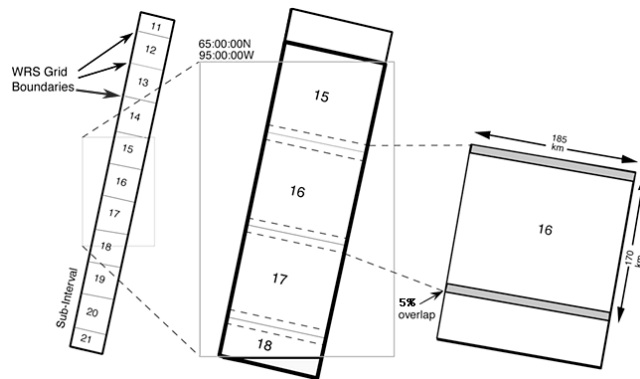


Figura 3.11 - Dimensão das imagens Landsat captadas.

É de referir que ainda estão activos os satélites Landsat 4 e 5, continuando a recolher-se os seus dados.

Quadro 3.3 - Bandas do sensor ETM+.

Sensor	Banda	Intervalo de comprimentos de onda (μm)	Resolução espacial (m)
ETM+	1	0,45 - 0,515	30 m
	2	0,525 - 0,605	30 m
	3	0,63 - 0,69	30 m
	4	0,75 - 0,90	30 m
	5	1,55 - 1,75	30 m
	6	10,4 - 12,5	60 m
	7	2,09 - 2,35	30 m
	8	0,52 - 0,9	15 m

O sucesso do Landsat deve-se a diversos factores, incluindo a combinação de sensores com bandas espectrais adaptadas à observação terrestre, resolução espacial adequada, e boa cobertura aérea (largura da *swath* e período de temporal de aquisição de imagens do mesmo local).

A longa duração do programa permitiu a construção de um enorme arquivo de dados dos recursos terrestres, facilitando a monitorização a longo prazo, registos históricos e investigação apoiada nesses registos. Todos os satélites Landsat são colocados em órbitas quase polares heliossincronizadas (Figura 3.12).

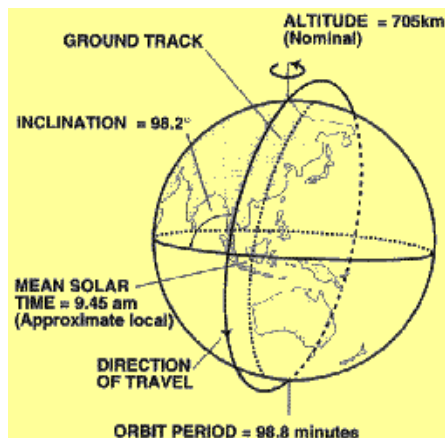


Figura 3.12 - Órbita do satélite Landsat.

Todos os satélites Landsat cruzam o equador de manhã, de forma a otimizar as condições de iluminação.

Vários sensores têm sido colocados a bordo da série de satélites Landsat, incluindo os sistemas de câmaras **RBV (Return Beam Vidicon)**, os **scanners multiespectrais (MSS)**, o **sensor TM (Thematic Mapper)**, e o **sensor ETM+ (Enhanced Thematic Mapper Plus)**. Cada um destes sensores fez a recolha de dados em faixas de varrimento com 185 Km de largura.

SPOT

O *Centre National d'Études Spatiales* (CNES) de França em parceria com a Suécia e Bélgica, colocou em órbita em 1986 o *Système Probatoire d'Observation de la Terre* (SPOT), um sistema dotado de tecnologia de aquisição de imagem substancialmente diferente da dos Landsat.

As características orbitais são semelhantes às dos sistemas descritos anteriormente. A órbita é circular, quase - polar, heliossíncrona, com uma altitude nominal de 832 km e uma inclinação de 98,7°, o que resulta na repetição da órbita ao fim de 26 dias. O Spot cruza o equador na fase descendente da sua trajectória, cerca das 10:30, hora solar local. A hora de passagem ocorre ligeiramente mais tarde no hemisfério Norte (11:00 h a 40°N) e ligeiramente mais cedo no hemisfério Sul (10:00 h a 40°S). O SPOT-1 foi lançado em 1986, seguindo-se os seus sucessores, cada três ou quatro anos. Estes satélites foram concebidos para fornecerem dados comerciais de observação terrestre. Pela primeira vez utilizou-se a tecnologia de varrimento ao longo da trajectória ou de *pushbroom*.

Os satélites SPOT têm a bordo sensores ópticos, em bandas do visível, infravermelho próximo e infravermelho médio.

- Os SPOTs 1, 2, e 3 são idênticos e cada um dispõe de dois sistemas HRV, que independentemente examinam a superfície da Terra. Cada HRV pode operar em dois modos diferentes: tanto no modo XS (com três bandas espectrais: Verde, Vermelho e Infravermelho Próximo com 3000 pixels por vector de rasterização e a dimensão de cada pixel é de 20m x 20m, ou o modo PAN (uma única banda espectral pancromática de 6000 pixels por cada vector de rasterização e o pixel teria um tamanho de 10m x 10 m). Normalmente os dois HRVs cobrem duas linhas de rasterização adjacentes de 60 Km, que se sobrepõem em aproximadamente 3 Km. Como inovação adicional, cada HRV pode rodar lateralmente (perpendicular à linha de órbita) de um ângulo de mais ou menos 27°, de tal forma que poderão ser registadas imagens numa posição fora do ponto nadir ou seja vistas laterais ou oblíquas (Figura 3.13). De um stereo-par pancromático (duas imagens da mesma região registadas de duas direcções visuais diferentes) pode-se obter o Modelo Digital do Terreno (*Digital Terrain Model* - DTM), em suma teríamos uma imagem digital com a cota média de cada pixel. A capacidade de visualização lateral torna possível obter mais imagens de uma determinada área de estudo o que faz aumentar a resolução temporal. Por conseguinte um utilizador português mediante o respectivo pagamento poderia pedir à SPOT-IMAGE (empresa que gere o sistema em Toulouse/França) que o providenciasse com todas as imagens possíveis por cima de Portugal. Para todas as órbitas do satélite SPOT perto de Portugal o ângulo do sistema HRV seria ajustado de forma a obter o maior número possível de imagens sobre Portugal.

Com o lançamento do SPOT 5, ocorrido em Maio de 2002, este programa torna possível a aquisição de imagens orbitais tridimensionais graças a sua capacidade de visada lateral de até 27° (estereoscopia cilíndrica) e também conseguiu melhorar a resolução espacial do canal pancromático para 5 metros.



Figura 3.13 – SPOT-HRS. (Fonte: Spotimage, 2003).

A bordo do satélite SPOT – 4 e 5 está o sensor multiespectral VEGETATION com uma resolução espacial de 1 km e uma faixa de cobertura de 2400 km, oferecendo uma cobertura de toda a superfície terrestre. O SPOT 4 foi lançado a 4 de Março de 1998, com uma órbita quase polar ($98,72^\circ$), heliossíncrona e com uma altitude média de 830 km e recolhe dados sobre a superfície terrestre numa faixa com a largura de 2200 km, que corresponde a um ângulo de abertura de 101° . A resolução espacial do sensor, representada por uma grelha de células, designadas por pixels (*picture elements*), varia entre aproximadamente 1 km no nãdir (0°) e 1,7 km no ângulo máximo observado. A sua resolução temporal que correspondente ao intervalo de tempo entre duas observações consecutivas da superfície terrestre, com as mesmas condições geométricas, é de 26 dias com hora de aquisição às 10:30 (hora solar local). Nas zonas equatoriais este satélite recolhe dados quase diariamente e para as latitudes superior a 35° N e a 35° S, recolhe dados pelo menos uma vez por dia. A sua resolução espectral é de quatro bandas, no azul, vermelho (V), infra-vermelho próximo (IVP) e infra-vermelho médio (IVM), especialmente concebidas para caracterizar a vegetação (VEGETATION User Guide - <http://www.spot-vegetation.com>), nomeadamente da absorção da clorofila, estrutura das copas e o estado da vegetação (Quadro 3.4).

Quadro 3.4 - Características espectrais do sensor SPOT 4 - VGT.

Banda	Região do espectro eletromagnético	Amplitude espectral (μm)	Parâmetro a caracterizar
1	Azul	0,43 – 0,47	estado da atmosfera
2	Vermelho	0,61- 0,68	absorção da clorofila
3	Infravermelho Próximo	0,78 – 0,89	estrutura das copas
4	Infravermelho Médio	1,58 – 1,75	estado hídrico da vegetação

Os dados fornecidos pelo sensor incluem informação sobre a geometria de observação e iluminação, nomeadamente os ângulos zenitais solar (AZS), e o de observação (AZO), e os ângulo azimutais solar (AAS) e os de observação (AAO). Estes dados VGT têm uma grande vantagem relativamente a outros de detecção remota, nomeadamente a elevada qualidade geométrica, caracterizada por uma alta precisão de georreferenciação multiespectral (0,2 km), georreferenciação multitemporal (0,325 – 0,885 km) e georreferenciação absoluta (0,300 – 0,725 km). Informação mais detalhada sobre o sensor VGT pode ser encontrada em Sylvander *et al.* (2000) e CNES (1999).

Os dados originais são recebidos pela Estação de Recepção de *Esrange*, (Kiruna, Suécia) e transformados em produtos P, S1 e S10 no Centro de Processamento de Imagem do *Vlaamse Instelling voor Technologisch Onderzoek* (VITO) (Mol, Bélgica). O produto P é

corrigido somente para eliminar erros de calibração e de georreferenciação, cujas as unidades são em refletância no topo-da-atmosfera. Os produtos de síntese (S) são obtidos através de um processo de composição multitemporal de várias passagens do sensor, podem ser relativos a um dia (S1) ou a 10 dias (S10). O processo de composição multitemporal usa como critério o valor máximo do índice de Vegetação de Diferença Normalizada (*Normalized Difference Vegetation Index* - NDVI). Os produtos S para além das correcções aplicadas aos produtos P, também são corrigidos para o efeito atmosférico. Este processo é realizado pelo *Centre National d'Etudes Spatiales* (CNES) (França) usando o algoritmo de *Simplified Method for Atmospheric Correction* (SMAC) (Rahman & Dedieu, 1994). Os produtos S encontram-se em unidades de refletância na superfície. Ainda existem outros produtos de síntese de 10 dias, resultantes da degradação espacial para quatro (S10.4) e oito (S10.8) km. Toda a informação relativa aos produtos VGT pode ser encontrada em CNES (1999).

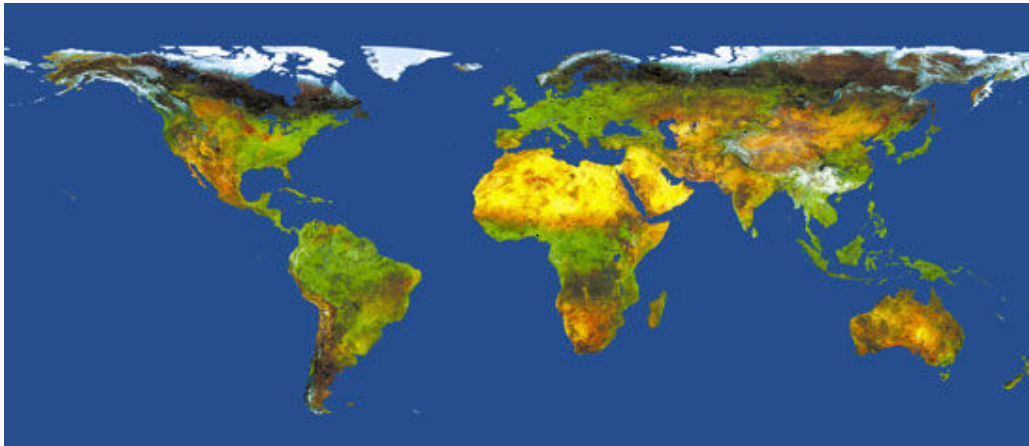


Figura 3.14 - Mosaico de imagens SPOT – VEGETATION. (Fonte: <http://www.spot.com/web/SICORP/536-sicorp-vegetation.php>).

Principais Aplicações

- Impacto das actividades humanas sobre o meio ambiente;
- Monitoramento de fenómenos naturais;
- Acompanhamento do uso agrícola das terras;
- Apoio ao monitoramento de áreas de preservação;
- Actividades energético-mineradoras;
- Cartografia e actualização de mapas;
- Desflorestação;
- Dinâmica de urbanização;
- Estimativas de fitomassa;
- Monitoramento da cobertura vegetal;
- Queimadas;
- Secas e inundações;
- Sedimentos em suspensão nos rios e estuários.

Quadro 3.5 - Características espectrais dos sensores HRV e VGT do SPOT.

Sensor	Modo	Banda	Comprimento de Onda (μ m)
HRV	Pancromático		0,51 – 0,73 (azul-verde-vermelho)
			0,50 – 0,59 (verde)
	Multiespectral	1	0,61 – 0,68 (vermelho)
		2	0,79 – 0,89 (IV próximo)
VGT	Multiespectral	1	0,43 – 0,47 (azul)
		2	0,61 – 0,68 (vermelho)
		3	0,78 – 0,89 (IV próximo)
		4	1,58 – 1,75 (IV médio)

IRS

combina as características dos sensores Landsat MSS/TM e do sensor SPOT HRV. uma câmara de elevada resolução de canal simples pancromático (PAN), um sensor LISS-III (*Linear Imaging Self-scanning Sensor*) de quatro canais com resolução média, e um sensor WiFS (*Wide Field Sensor*) de dois canais e de baixa resolução. A tabela seguinte descreve as características específicas de cada sensor.

A série de satélites indianos (*Indian Remote Sensing – IRS*), são geridos pela Indian Space Research Organization (ISRO) e pela *National Remote Sensing Agency* (NRSA). O principal objetivo das suas missões é fornecer dados de deteção remota para o NNRMS (*National Natural Resources Management System*) da Índia. O terceiro satélite da série, o IRS-1C, foi lançado em Dezembro de 1995, é um satélite multi-funcional que combina a resolução multispectral com uma resolução espacial evoluída e uma cobertura muito ampla. Tem uma órbita quase polar, sincronizada com o sol, com uma altitude média de 817 km.

Quadro 3.6 - Características dos sensores a bordo do satélite IRS –1C.

Sensor	Resolução Espectral	Resolução Espacial	Faixa de Varrimento	Resolução Radiométrica	Resolução Temporal
LISS III	0,52-0,59 um	23,5 m	142 km	7 bits (128 níveis)	24 dias
Linear Imaging Self-scanning Sensor III	0,62-0,68 um	23,5 m	142 km	7 bits (128 níveis)	24 dias
	0,77-0,86 um	23,5 m	142 km	7 bits (128 níveis)	24 dias
	1,55-1,75 um	70,5 m	148 km	7 bits (128 níveis)	24 dias
PAN Sensor Pancromático	0,5-0,9 um	5,8 m	70,5 km	n.d.	5 dias
WiFS Wide Field Scanner	0,62-0,68 um	188 m	770 km	7 bits (128 níveis)	5 dias
	0,77-0,86 um	188 m	770 km	7 bits (128 níveis)	5 dias

Principais Aplicações:

- cartas de ocupação do solo,
- florestação
- monitorização de vegetação e agricultura, entre outras.

Os futuros satélites IRS incluirão sensores para auxiliar aplicações oceanográficas, climáticas e atmosféricas, bem como sensores que oferecerão alta-resolução, capacidades hiper-espectrais para aplicações ambientais avançadas.

QuickBird

O QuickBird foi desenvolvido pela *DigitalGlobe* (Estados Unidos) e foi lançado a 18 de Outubro de 2001. Este satélite é de alta precisão que oferece imagens comerciais de alta resolução espacial da Terra. O sistema recolhe dados com 61 centímetros de resolução espacial no pancromático e 2,5 metros no multiespectral em um vasto campo de observação, apresenta rápida selecção de alvo e permite obter pares estereoscópicos. A resolução temporal média é de 1 a 3,5 dias. A sua órbita tem 93,4 minutos de duração com uma altitude de 450 km e uma inclinação de 98°.

Quadro 3.7 - Características do QuickBird.

Sensor	Bandas	Resolução Espectral	Resolução Espacial	Resolução Temporal	Faixa
QUICKBIRD	Pancromática	450 - 900 nm	61 a 72 cm	1 a 3,5 dias, dependendo da latitude	16,5 x 16,5 km
	Multiespectral (Visível)	450 - 520 nm	2,4 a 2,8 m		
		520 - 600 nm 630 – 690 nm			

Principais Aplicações

- Cartografia urbana e rural que exijam alta precisão dos dados (cadastro, redes, planeamento, telecomunicações, saneamento, transportes);
- Cartografia básica e aplicações gerais em Sistemas de Informação Geográfica;
- Uso da Terra (com ênfase em áreas urbanas);
- Estudo de áreas verdes urbanas;
- Estimativas de colheitas e demarcação de propriedades rurais;
- Laudos periciais em questões ambientais.

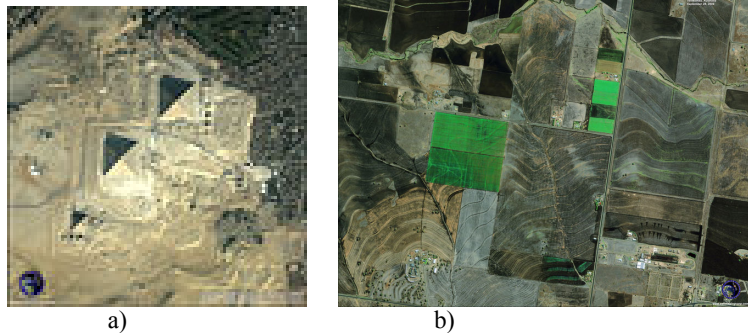


Figura 3.15 - Imagens do QuickBird: a) Egípto b) Touamba – Austrália.
(Fonte: <http://www.satimagingcorp.com>)

IKONOS

O satélite Ikonos é um satélite de observação da terra comercial, tendo sido o primeiro a disponibilizar imagens ao público com resolução de 1 a 4 m por pixel. As imagens do Ikonos começaram a ser vendidas em Janeiro de 2000 pela empresa GeoEye. O satélite Ikonos II, operado pela *SPACE IMAGING*, foi lançado em 24 de Setembro de 1999, sendo o primeiro satélite comercial de alta resolução, de 1 metro. Este satélite tem uma órbita polar, circular, sincronizada com o sol com uma altitude de 681 km (Figura 3.16). As imagens cobrem uma faixa de 11 km e são adquiridas pela ORBIMAGE.

O seu sensor capta imagens no modo pancromático (1 m de resolução espacial) e multiespectral (4 m de resolução espacial). Adicionalmente, há a possibilidade de combinação de imagens preto e branco com dados multiespectrais para a geração de imagens coloridas, facilitando assim a interpretação visual e substituindo em grande parte dos casos, o uso de fotografias aéreas.

A título de curiosidade a palavra Ikonos quer dizer imagem em grego.

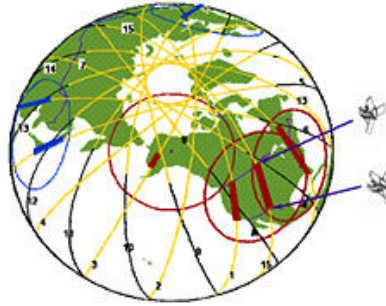


Figura 3.16 - Órbitas do IKONOS. (Fonte: <http://www.sisea.co.th/ikonos/images>)

Quadro 3.8 - Características espectrais do IKONOS.

Resolução espectral			
	Bandas	0,8 m PAN	4m MS e 1m PS
1	Azul	0,45 – 0,90	0,445 – 0,516
2	Verde	0,506 – 0,595	0,506 – 0,595
3	Vermelho	0,632 – 0,698	0,632 – 0,698
4	Infravermelho próximo	0,757 – 0,853	0,757 – 0,853

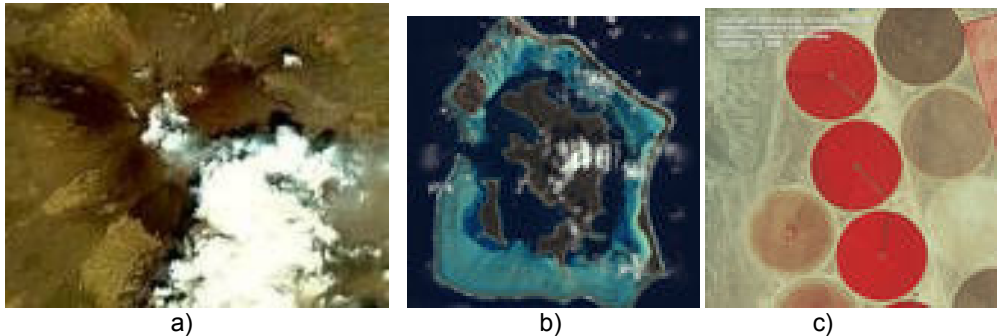


Figura 3.17 - Imagens do satélite IKONOS: a) Etna, b) Bora Bora (Pacífico) e c) Pivôs (Arábia Saudita). (Fonte: <http://www.geoeye.com/products/imagery/ikonos>).

TERRA

A plataforma orbital TERRA foi lançada em 18 de Dezembro de 1999 como parte do programa *Earth Observing System* (EOS), da NASA e tem por objetivo principal adquirir dados que possam aumentar nossos conhecimentos sobre a dinâmica atmosférica global, sobre a interação terra, oceano e atmosfera. Estes dados começaram a ser adquiridos em Fevereiro de 2000. Actualmente existem três satélites do programa EOS em órbita e pretendem-se lançar outros quinze durante os próximos anos. A bordo do satélite TERRA estão vários sensores: MODIS, ASTER, CERES, MISR e MOPITT.

3.5.2. Satélites para observações meteorológicas

A série METEOSAT e os satélites NOAA são geridos pela Organização Mundial de Meteorologia (WMO) e são principalmente utilizados na previsão do tempo (aqui as nuvens não são nenhum ruído mas sim um objecto de estudo). As imagens NOAA-AVHRR também provaram ser muito úteis na monitorização da superfície da Terra a uma escala continental. O satélite NOAA - AVHRR são um caso especial. Como para o LANDSAT-TM e MSS as imagens

são formadas através de um espelho oscilatório. Apesar da órbita quase-polar, o sistema tem um poder sinóptico bastante elevado (largura de 3000 Km) o que é compensado pela sua baixa resolução (pixels de 1 Km x 1 Km). Ao contrário do LANDSAT e do SPOT, não existem espaços por cobrir entre as diferentes órbitas do satélite. Como a plataforma faz 14,2 ciclos por dia, a superfície total da terra é coberta num único dia. Contudo, numa forma mais precisa a resolução temporal é de 9 dias: no dia 10 começa exactamente o mesmo esquema orbital que iniciou no dia 1. Com duas plataformas NOAA no espaço, cada região na terra pode ser registada duas vezes por dia: uma de manhã e outra à tarde (para as bandas do Infravermelho térmico até 4 bandas poderão estar disponíveis).



Figura 3.15. Satélite NOAA.

Em Setembro de 1993, o lançamento do LANDSAT 6 falhou e o satélite perdeu-se. De forma a competir com a plataforma francesa (SPOT) continha também além dos sistemas MSS e TM, um sensor pancromático de alta resolução com pixels de 15 por 15m.

Aqua

O satélite AQUA, lançado a 4 de Maio de 2002 faz parte do projeto *Earth Science Enterprise* (ESE) da NASA que se propõe obter e interpretar dados para compreender a dinâmica terrestre e as mudanças globais causadas pela actuação humana ou pela própria natureza. O AQUA segue uma recente tendência em satélites de monitoramento que é a de incluir vários sensores a bordo da mesma plataforma espacial, desenvolvidos por vários países e com distintas aplicações.

Principais Aplicações

- Obtenção de medidas de fluxo de energia radioactiva;
- Aquisição de dados de unidade atmosférica;
- Medidas de temperatura da superfície marítima e terrestre;
- Características das nuvens;
- Fluxo de energia radioactiva.

IV. Processamento e análise de imagens

Com o avanço da tecnologia, a maior parte dos dados de detecção remota encontram-se em formato digital, envolvendo a sua análise e interpretação algum grau de processamento digital. Estes processamentos exigem uma formatação e correcção adequada dos dados bem como a sua interpretação visual. Estes dados são posteriormente classificados por vezes de forma automática utilizando um sistema de análise de imagem constituído por *hardware* e um *software* com tais capacidades.

4.1. Interpretação Visual

A interpretação visual das imagens é o primeiro da análise de imagens de satélite. O reconhecimento de alvos é a chave para a interpretação e obtenção de informação. Visualmente pode-se detectar diferenças através do padrão, textura, forma, tom de cor, etc. numa imagem de satélite. Também há que ser tomado em conta a resolução da imagem, dependendo deste factor a sua facilidade de interpretação visual. Se uma imagem tem uma resolução espacial alta a sua interpretação visual é mais fácil, porque se consegue identificar objectos concretos e por vezes bem definidos na imagem. No caso contrário, com imagens de baixa resolução espacial, cada pixel cobre uma área de grandes dimensões distorcendo assim as formas e padrões, tornando mais difícil a interpretação das imagens.

As imagens podem ser analisadas visualmente banda a banda, neste caso em tons de cinzento, para melhor interpretação. No entanto pode-se combinar as imagens de modo a realçar melhor o que se pretende identificar ou no geral da imagem. Uma das combinações mais utilizada é RGB (Red, Green, Blue), ou seja atribuir determinadas bandas a estas cores e assim realçar os diferentes padrões na imagem.

Para melhorar o contraste entre os diversos padrões da imagem pode-se aplicar técnicas de realce de imagem, descrito no ponto 4.3.

4.3. Pré-processamento

O pré-processamento das imagens de satélite inclui operações aplicadas sobre as imagens antes da sua análise e extracção de informação. Estas aplicações traduzem-se essencialmente em correcções geométricas e radiométricas.

4.2.1. Correcções geométricas

As correcções geométricas incluem a correcção de distorções geométricas devidas a variações na geometria do sensor ou da Terra e a conversão das coordenadas terrestres para coordenadas verdadeiras. A rotação da Terra combinada com a deslocação do satélite provoca um desvio nos pixels para a região em observação. Uma outra distorção que pode surgir nos sensores de varrimento, como é o caso dos sensores do satélite Landsat, é a alteração da dimensão e forma dos pixels consoante se afastam do nadir. No nadir e na sua vizinhança os pixels têm a resolução definida para o sensor, neste caso 30 m por 30 m, mas nas extremidades da imagem captada, os pixels passam a abranger uma área maior e rectangular.

A curvatura da Terra é um outro factor que pode incluir deformações na geometria das imagens que abrangem grandes áreas, como as imagens NOAA e SPOT. Na extremidade destas imagens, os pixels também apresentam distorção devido à curvatura da Terra, com um factor de 2,89 a 4,94 para o sensor AVHRR. Ainda podem surgir deformações geométricas devido a alterações da altitude, velocidade e posição da plataforma. Também podem surgir deformações devido a erros instrumentais, principalmente em instrumentos cujo a leitura da superfície é realizada através de espelhos por varrimento.

Algumas imagens são captadas sem atribuição de coordenadas geográficas, assim antes de se proceder à extracção de informação sobre estes dados tem de se corrigir

geometricamente, atribuindo um sistema de projecção e um datum apropriado para o local na superfície terrestre a que corresponde a imagem. Com coordenadas atribuídas a informação obtida pode ser cruzada com outros tipos de informação num sistema de informação geográfica.

Para realizar a correcção geométrica de dados obtidos por detecção remota há duas abordagens:

- Modelar os factores de distorção e diminuir a correcção a ser aplicada.
- Aplicar uma transformação polinomial para corrigir a imagem, utilizando pontos de controlo para estimar os parâmetros dessa transformação.

A transformação polinomial é realizada tendo como base uma grelha com as coordenadas que se pretendem atribuir aos dados, ou uma imagem ou um ficheiro vectorial já com as coordenadas correctas. Os pontos de controlo são marcados na imagem original e na imagem de referência e assim são estimados os parâmetros para a transformação polinomial. Os pontos de controlo devem estar bem distribuídos na imagem, para a aplicação da correcção ser uniforme.

A escolha do polinómio depende do grau de distorção da imagem. Polinómio de primeiro grau tem como transformação possível a rotação, translação e mudança de escala. Os polinómios de grau dois e três para além das transformações anteriores também corrigem torção e encurvamento. Quanto maior o número de parâmetros a estimar (primeiro grau – 3 parâmetros, segundo grau – 6 parâmetros e terceiro grau – 10 parâmetros) maior o número de pontos de controlo necessários, que devem ser aproximadamente duas vezes o número de parâmetros. A estimação dos coeficientes do polinómio é feita pelos métodos dos mínimos quadrados.

Critérios de reamostragem

Uma vez definida a transformação entre a geometria da imagem original e a geometria na qual se pretende fazer o novo registo geométrico, procede-se à reamostragem da imagem. A concordância entre o centro dos pixels e as novas coordenadas quase nunca acontece (Figura 4.2), para contornar este factor tem de ser aplicado critérios de reamostragem da imagem:

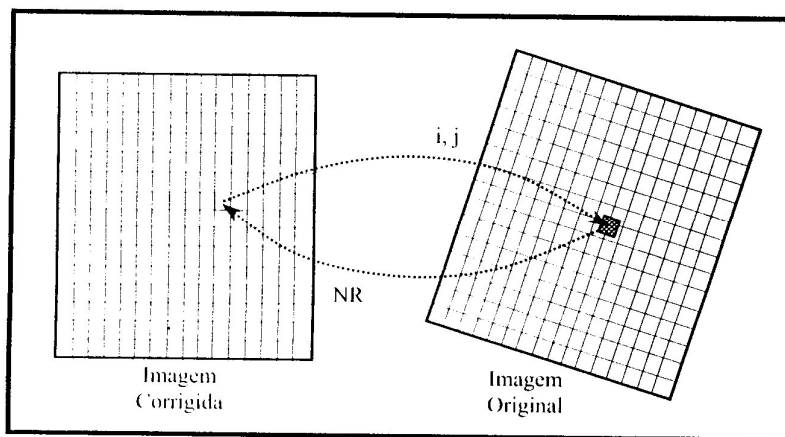


Figura 4.2. Reamostragem da imagem. (Fonseca e Fernandes, 2004)

- **Critério do vizinho mais próprio** – este critério é escolhido pelos utilizadores que pretendem manter os níveis radiométricos (NR) com os seus valores originais. Para a nova localização vai ser escolhido o pixel que está a menor distância.
- **Método de interpolação bilinear ou cúbica** – estes critérios calculam as médias dos NR, funcionando como filtros, que fazem uma média para um determinado conjunto de NR, que estão mais próximos da nova coordenada. Estes critérios não preservam os NR originais e

atenuam a diferença de intensidade entre os elementos de imagem, o que altera os resultados obtidos de procedimentos posteriores às imagens.

4.2.2. Ortorrecificação de imagem

Determinados trabalhos exigem uma elevada precisão geométrica, o que por vezes não se consegue obter com os pontos de controlo, por exemplo, quando se pretende actualizar ou realizar cartografia. O processo que permite este uso dos dados obtidos por detecção remota designa-se por ortorrecificação, que consiste na correcção geométrica descrita anteriormente mas também na eliminação de um deslocamento radial dos elementos de imagem ao longo de cada linha da imagem. Este deslocamento surge devido à geometria projectiva com as imagens são recolhidas e depende da altitude de terreno correspondente e da sua distância ao longo da linha, à imagem do nadir do satélite (Figura 4.3). O deslocamento é corrigido colocando o pixel na nova posição ao longo de cada linha, adicionando um deslocamento no sentido do traço da órbita, dado por:

$$D = H \operatorname{tg} \alpha$$

Onde H é a altitude do elemento de terreno correspondente, conhecida, e α o ângulo de vista com que a sua imagem foi adquirida.

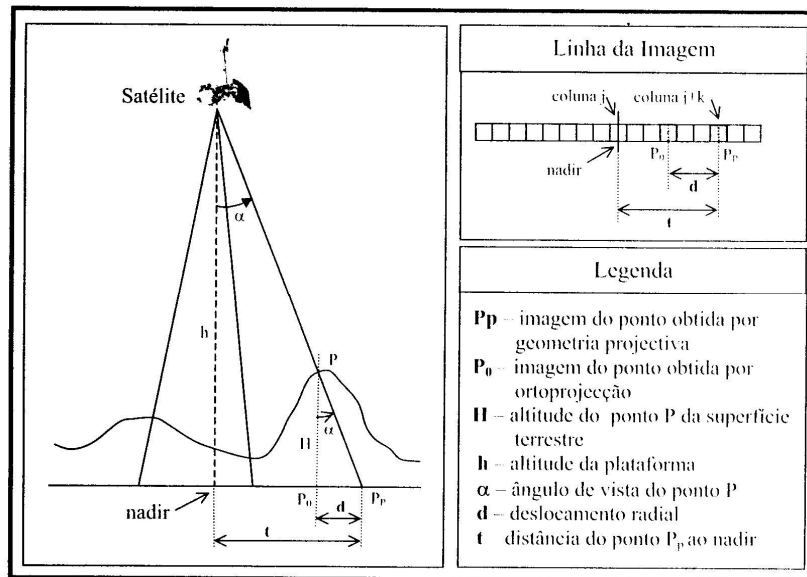


Figura 4.3 - Deslocamento radial. (Fonseca e Fernandes, 2004)

Para realizar a ortorrecificação é necessário dispor do modelo digital do terreno também designado por modelo altimétrico porque a correcção do deslocamento radial depende da altitude do ponto.

4.2.3. Correções radiométricas

O restauro radiométrico refere-se à diminuição das distorções que podem existir no registo da energia eletromagnética por cada radiómetro. Uma variação razoável de agentes podem causar tais efeitos. Algumas das distorções mais comuns para as quais existem procedimentos de correcção são:

- **Valores uniformes muito elevados**, por exemplo a nebulosidade que preferencialmente reflecte as ondas de curto comprimento de onda (particularmente as ondas na banda do azul) -
- **Presença de feixes**, devido por exemplo aos detectores não estarem calibrados **ruído aleatório**, devido à perda de sinal de alguns detectores.

Também é apropriado incluir no restauro radiométrico os procedimentos que são usados para converter as linhas de dados de valores de referência das bandas originais em verdadeiras grandezas de energia radiante.

4.3. Realce de imagens

O realce de imagens preocupa-se em modificar a imagem de forma a que seja de mais fácil interpretação visual. A análise visual é bastante importante em todos os aspectos de detecção remota. O realce de imagem inclui um número elevado de técnicas, no entanto convém salientar as três seguintes:

- **Aumento de contraste (*stretch*)**: Os sensores dos satélites aceitam um intervalo de valores de reflectância relativamente grande de forma a que possam interpretar todos os valores presentes na paisagem. Contudo em alguns ambientes simples e monótonos teremos apenas um determinado tipo de valores não muito divergentes. Nestes casos aparecerão imagens muito acinzentadas e com pouco contraste, por isso, a manipulação do contraste é bastante importante para a maior parte das análises visuais.
- **Imagens compósitas**: Na análise visual, as imagens compósitas fazem uso de toda a capacidade do olho humano. Estas imagens obtêm-se desde a selecção das bandas a usar até ao envolvimento de processos que combinam essas mesmas bandas e as associam ao realce de imagens (*stretch*).
- **Filtros digitais**: A análise digital permite o uso de filtros digitais que podem por exemplo realçar as zonas de transmissão de uma imagem, isolar alinhamentos ou direcções preferenciais, para mencionar só alguns.

4.4. Transformação de dados

4.4.1. Quocientes e índices de vegetação

O índice espectral de vegetação, normalmente designado apenas por índice de vegetação (IV), é um valor obtido directamente ou através de um quociente, diferença ou outra transformação de dados espectrais. Este valor representa as características da vegetação, como o índice de área foliar, biomassa, peso verde, peso seco, percentagem de coberto, etc. Os índices de vegetação usam-se portanto, para correlacionar dados espectrais com parâmetros de vegetação.

Um bom índice de vegetação deverá satisfazer alguns critérios:

- realçar o sinal da vegetação;
- normalizar o efeito de sinais “não- verdes”, tais como solo e água.
- Minimizar o efeito de variações externas, devidas à atmosfera e às geometrias de iluminação e observação).
- ser de aplicação generalizável no espaço e no tempo.

Os diferentes tipos de ocupação do solo, muitas vezes diferem ligeiramente entre si quando comparadas algumas bandas espectrais. Quando se faz o quociente entre duas bandas espectrais diferentes, a imagem resultante evidencia as variações nas curvas de resposta espectral. A vegetação saudável reflecte muito na região do espectro correspondente ao infravermelho próximo e absorve na região do visível. A região do vermelho exibe uma relação inversa e não linear com a quantidade de biomassa verde. O vermelho é inversamente proporcional à quantidade de clorofila presente no copado e, portanto, sensível à vegetação verde ou fotossinteticamente activa presente. A relação entre a radiância do infravermelho próximo e a biomassa verde é também não-linear, mas directa. Esta relação resulta da ausência de absorção espectral nesta região do espectro, acompanhada por elevado grau de dispersão intra e inter-foliar da radiação pelo copado. Na ausência de absorção espectral, uma quantidade proporcionalmente maior de radiância espectral incidente emerge do copado, relativamente à que é absorvida.

Os índices espectrais permitem também fazer uma melhor identificação das áreas com vegetação não saudável, que apresentam baixa reflectividade no infravermelho próximo.

4.4.1.1. Índices Baseados em Quocientes

O índice de vegetação do quociente simples (*Simple Ratio Vegetation Index*, $SR = IVP/V$) e o índice da diferença normalizada (*Normalized difference Vegetation Index*, $NDVI = (IVP - V)/(IVP + V)$) são os índices mais comuns deste tipo. Ambos envolvem quocientes de valores simples ou combinações lineares de bandas do IVP e Vermelho.

As áreas de vegetação normalmente vão ter valores elevados para ambos os índices devido às reflectâncias relativamente elevadas no infravermelho próximo e baixa reflectância no vermelho. Com valores negativos surgem as nuvens, água e neve, cujas reflectâncias são maiores no vermelho do que no infravermelho próximo. Os solos têm reflectâncias similares nas duas bandas e resultam em índices de vegetação próximos de zero.

Os índices de quocientes são úteis para normalizar as diferenças de irradiância devidas à geometria de iluminação e à Topografia, porque estamos a olhar para valores relativos e não absolutos de luminosidade.

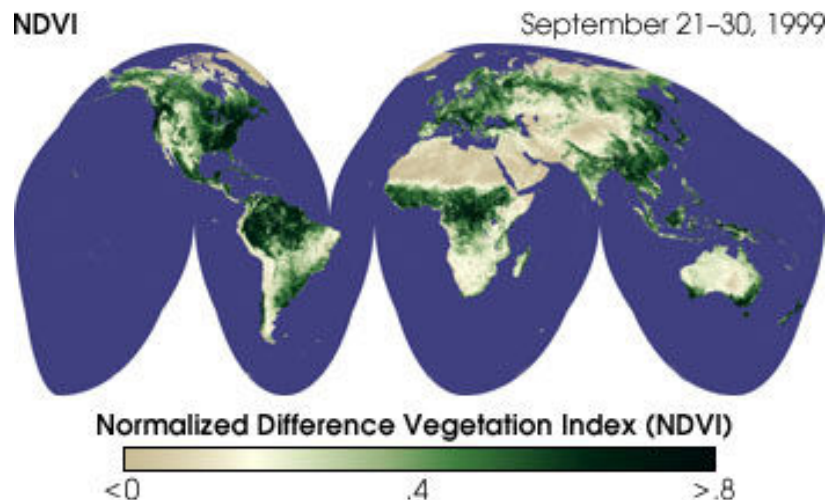


Figura 4.4 - Mapa global do comportamento do índice de vegetação NDVI.

O NDVI é muitas vezes utilizado para acompanhar a vegetação global, permitindo detectar as mudanças do coberto vegetal ao longo do tempo, devido a compensar as mudanças das condições de iluminação, do declive do terreno e exposição, entre outros factores em cada data.

4.4.1.2. Índices de tipo ortogonal ou índices de vegetação baseados em distâncias à linha de solos

Os índices de tipo ortogonal distinguem-se dos baseados em quocientes porque as isolinhas de quantidade de vegetação não convergem para a origem, mantendo-se paralelas à linha do solo. Estes índices maximiza o sinal da vegetação verde, mantendo constante a sua informação relativa ao solo. Alguns destes índices são: PVI (*Perpendicular Vegetation Index*), PVI1 (*Perpendicular Vegetation Index 1*), TSAVI1 (*Transformed Soil- Adjusted Vegetation Index 1*) e WDV1 (*Weighted Difference Vegetation Index*):

$$PVI = \frac{(b \times IVP - V + a)}{\sqrt{b^2 + 1}}; \quad TSAVI1 = \frac{a((IVP - a) \times (V - b))}{V + a \times IVP - a \times b}; \quad WDV1 = IVP - b \times V$$

Por exemplo o PVI requer o cálculo da distância ortogonal entre pixels contendo vegetação e a linha de solo. Para tal, tem de ser calculada a linha do solo, que pode ser ajustada por regressão.

Uma linha do solo é uma equação linear que descreve a relação entre valores de refletância no canal do vermelho e do infravermelho para pixels de solo exposto. Esta linha é produzida efectuando uma regressão linear simples entre o canal do infravermelho próximo e do vermelho de uma amostra de pixels de solo exposto. Uma vez conhecida essa relação, todos os pixels desconhecidos de uma imagem que possuam a mesma relação nos valores de refletância no vermelho e infravermelho são assumidos como solo exposto. Os pixels desconhecidos que se distanciam da linha de solo por terem valores de refletância mais elevados no infravermelho são assumidos como vegetação (baseados no padrão de resposta espectral da vegetação em que as refletâncias no infravermelho são elevadas em relação ao vermelho). Os pixels que se distanciam da linha de solo porque as suas refletâncias no vermelho são altas são frequentemente assumidos como água (também baseado nas características da água, que tomam valores elevados para o vermelho em relação ao infravermelho).

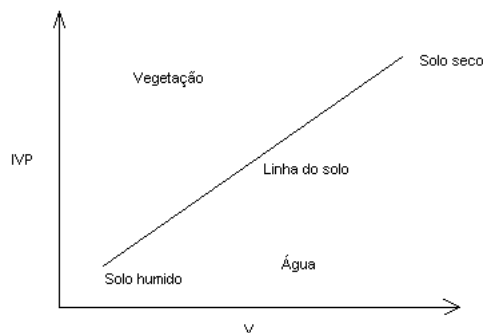


Figura 4.5 - Linha de solo

Um outro índice de vegetação ajustado para o solo é o SAVI (*Soil adjusted vegetation index*), que foi desenvolvido por Huete para melhorar a normalização do sinal da vegetação (vegetação herbácea e campos de algodão) afectado por diferentes tipos de solos. Pode ser definido da seguinte forma:

$$SAVI = [(IVP - V) / (IVP + V + 0.5)] \times 1.5$$

A influência da refletância do solo na assinatura espectral de copados parciais é importante, porque tanto os índices de quocientes como os ortogonais se revelam incapazes de

prever o comportamento de pixels com vegetação, à medida que estes se afastam da linha do solo.

4.4.2. Análise de componentes principais

Em imagens de satélite, é comum encontrar um elevado grau de correlação entre bandas multiespectrais. Por exemplo, as bandas 4 e 5 do Landsat MSS (verde e vermelho respectivamente) têm aparência visual semelhante porque as refletâncias para o mesmo tipo de cobertura são quase iguais. As técnicas de transformação baseadas no processamento complexo de características estatísticas de conjuntos de dados multi-bandas podem ser utilizadas para reduzir esta redundância e correlação entre bandas. Uma destas transformações é a Análise em Componentes Principais (ACP). Este método está relacionado com a análise factorial e pode ser usada para transformar um conjunto de bandas de uma imagem de forma que novas bandas (denominadas componentes) não estejam correlacionados entre si e passam a estar ordenados em termos da variância que elas podem explicar. O primeiro componente principal é calculado por forma a reter a maior quantidade possível de variância, o segundo é calculado da mesma forma tendo sido retirada dos dados originais a variância já contabilizada pelo primeiro componente e assim sucessivamente até serem obtidos tantos componentes principais quantas as variáveis originais.

Os componentes são portanto, uma abstracção estatística da variabilidade inerente ao conjunto de dados originais (o conjunto de bandas da imagem original). Como cada componente produzida por esta transformação não está correlacionada com a outra, cada uma carrega um determinado tipo de informação. Além disso como estão ordenados em termos da quantidade de informação que carregam, os primeiros componentes tenderão a carregar a maior parte da informação real de todo o conjunto de dados original, enquanto os últimos componentes irão descrever apenas variâncias menores. Uma aplicação da ACP é a compactação de dados uma vez que retendo apenas os primeiros componentes poderemos ficar com a maior parte da informação disponível.

O objetivo desta transformação é reduzir a dimensionalidade nos dados, e comprimir a maior parte da informação das bandas originais para menos bandas.

Quando duas variáveis estão perfeitamente correlacionadas ($\rho=1$), as medidas dos seus valores num gráfico bidimensional correspondem a uma linha recta. No caso contrário existe sempre uma direcção preferencial (Figura 4.6).

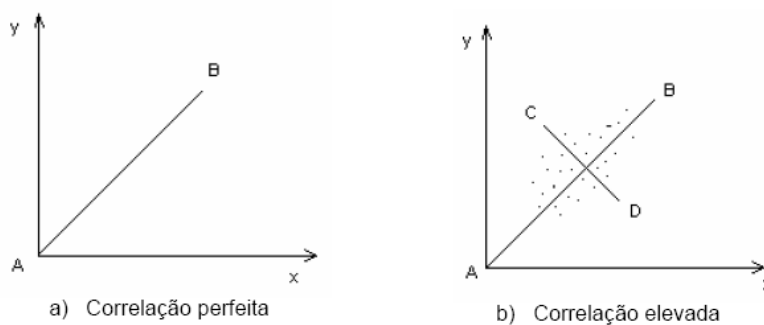


Figura 4.6 - Gráficos de correlação.

A figura 4.6 b) ilustra a possibilidade de se obter um novo sistema de eixos, em que o eixo AB representa a direcção dominante da variabilidade (ou primeira componente) e o eixo CD, perpendicular ao eixo AB a segunda componente.

Na detecção remota as imagens das diferentes bandas constituem as variáveis ACP, sendo possível obter um número de eixos inferior ou igual ao número de bandas consideradas. Através da ACP, os novos eixos são calculados por ordem decrescente de informação, isto é, o primeiro eixo ou vector próprio é o que contém maior informação.

As imagens obtidas por este método, podem ser visualizadas em composições coloridas, no entanto há que ter em atenção que os níveis digitais não correspondem às radiâncias originais, gravadas pelo sensor. Estas imagens podem ser utilizadas para melhor interpretação visual das imagens originais ou como variáveis na classificação digital.

4.4.3. Transformação de Tasseled Cap

O "tasseled cap / MSS", tetradimensional, foi desenvolvido por Kauth e Thomas e baseia-se nos mesmos princípios que os índices bidimensionais de Richardson e Wiegand. O conceito de linha de solo é igualmente fundamental e calcula-se também um índice de verdura, quantificando a distância ortogonal à linha de solo. A expressão "tasseled cap" significa algo como "barrete com franjas" e refere-se à forma aproximada da trajectória (num espaço (V, IVP)) de pixels de vegetação, ao longo da emergência, adensamento, maturação e senescência (Figura 4.7). A terceira dimensão ("amareleza") é ortogonal às duas primeiras e a quarta, ortogonal às três primeiras, será designada por "ausência" por não ser óbvia a sua associação a quaisquer características das imagens. Os coeficientes de verdura, brilho, etc. continuam a ser vectores unitários indicadores de direcção. Os proponentes deste índice demonstraram que o brilho e a verdura contém quase toda a variação presente numa amostra e sugeriram que as variações de "amareleza" e "ausência" poderiam ser indicadores das proporções de vegetação viva e morta do estado da atmosfera.

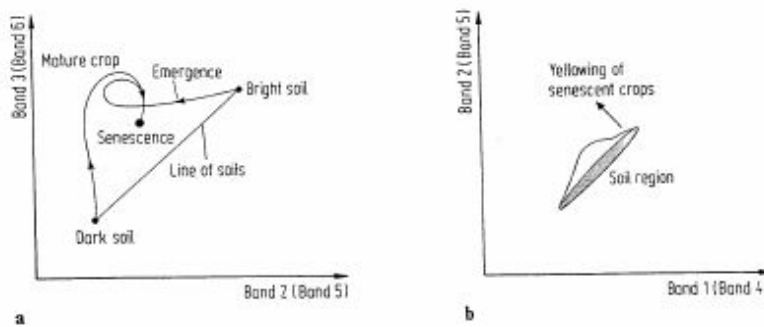


Figura 4.7 – Graficos do Tasseled cap. (Fonte:Richards, 1986).

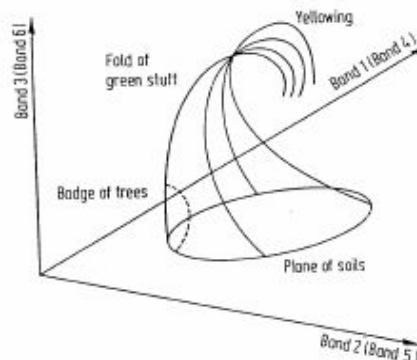


Figura 4.8 - Comportamento da vegetação em três bandas com aparência do "barrete com franjas". (Fonte: Richards, 1986)

O desenvolvimento da transformação "tasseled cap" teve três objetivos principais:

- promover a compreensão das relações entre bandas espectrais para as classes observadas numa imagem.

- comprimir as 4 bandas espectrais num menor número de variáveis, preservando o máximo possível de informação original.
- inferir características físicas da cena, a partir da informação espectral.

Com a entrada em funcionamento do LANDSAT TM, estes objetivos não só permaneceram válidos como ganharam mesmo maior relevância, devido ao aumento do número e dispersão espectral das bandas do novo sensor.

Principais características do "tasseled cap/TM".

A primeira dimensão dos dados, de novo designada por "brilho", é uma combinação linear aditiva das seis bandas reflectoras do sensor TM. Como tal, responde a variações de refletância total e aos processos físicos que as determinam. Diferenças em características dos solos, como textura ou teor de matéria orgânica, serão claramente expressos na dimensão brilho. Já um aumento de densidade de vegetação, por exemplo, que implica um aumento de resposta IVP acompanhado por diminuição de resposta no vermelho, afectará menos o brilho. Num estudo produzido pouco depois de o TM ter ficado operacional obteve-se uma correlação entre ambos os brilhos de 0,77.

A segunda dimensão principal dos dados "tasseled cap/TM", também se chama verdura, revelando as suas semelhanças com a verdura/MSS. Ambas representam o contraste entre os somatórios das bandas do visível e do IV. Os coeficientes de verdura/TM assumem valores tais que as duas bandas do IV mais longo se anulam mutuamente, de modo que resta a banda azul para exprimir a maior amplitude espectral do TM relativamente ao MSS. Mas, especialmente para a vegetação verde, esta banda correlaciona-se fortemente com as outras bandas do visível.

A verdura/TM e o brilho/TM definem conjuntamente o plano de vegetação. A terceira dimensão do "tasseled cap/TM" designa-se por "humidade" ("wetness") e representa informação completamente nova, ausente do MSS. As variações do teor de humidade afectam mais fortemente os valores das bandas IVM, pelo que o contraste entre ambos os grupos de bandas deverá revelar características das cenas relacionadas com o seu teor de humidade. A dimensão humidade e a dimensão brilho definem o plano de solos do "tasseled cap/TM".

As três dimensões características do "tasseled cap/TM" definem dois planos, os quais podem ser observados sob três perspectivas fundamentais. É preciso distinguir entre uma perspectiva específica, a qual projecta a totalidade dos dados sobre três dimensões, e os planos propriamente ditos, que apenas contém classes específicas da cena.

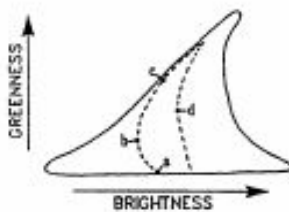


Figura 4.9 - Desenvolvimento da vegetação espectral, a) solo, b) verdura c) copas fechadas, d) senescência. (Fonte: Crist e Cicone, 1984)

4.5. Classificação de imagem

A Cartografia do Uso Solo é um dos muitos objetivos, para a qual as imagens de satélite, obtidas por observação da Terra podem ser utilizadas. A seguir explica-se os princípios gerais deste Tipo de Interpretação de Imagem com especial ênfase será dado às aplicações agrícolas e agro-estatísticas. Nesse caso, os seguintes requisitos deverão ser preenchidos, tanto quanto possível:

- Chave da classificação ou legenda do mapa

A legenda de um mapa consoante os seus objetivos deverá ser exaustiva e detalhada. Não somente as categorias gerais do terreno deverão ser reconhecidas (como: água, floresta, terras de cultivo, áreas urbanas, etc.), mas também os importantes tipos de cultivo (trigo (wheat), cevada (barley), milho (maize), beterraba (beet), batatas (potatoes),...), diferentes tipos de floresta, coníferas (coniferus) versus de folha caduca (deciduos), ou mesmo ao nível de espécies de árvores, etc.

- Cartografia deverá ser feita ao nível da parcela

O termo parcela surge aqui como uma parte do terreno, com um único tipo de ocupação espacial uniforme (uma das entradas da chave de classificação, por esta razão, para além de parcelas de culturas agrícolas, também há parcelas urbanas, parcelas de água, etc.). Deste modo a parcela representa a melhor e mais eficiente unidade espacial de armazenamento e processamento da informação do terreno. No entanto, o sistema de registo do satélite impõe uma quase diferente e arbitrária delimitação espacial da unidade, pixel. Um dos muitos problemas associados à interpretação de imagens está relacionado com a incompatibilidade entre ambas as unidades do terreno: na imagem a associação entre pixels e parcelas é mais do que evidente.

O resultado final fica compreendido entre duas componentes:

- O mapa de culturas e de uso do solo da área em estudo baseado na **parcela**.
- E uma **tabela agro-estatística** com uma distribuição das unidades consideradas na chave de classificação.

Claro que ambos os resultados devem ter máxima confiança. Qualquer que seja a escala ou temática, cada mapa (que tem por base polígonos) deve respeitar a **Área Mínima Cartográfica** de cerca 4mm x 4mm. Se muitos polígonos (neste caso: parcelas) têm uma superfície de mapeamento inferior, o mapa adquire uma aparência confusa e torna-se ilegível. Para pequenas escalas (1/25.000 a 1/100.000), a área mínima cartografada no terreno excede o tamanho mínimo da parcela. Por exemplo na Bélgica, o tamanho mínimo parcelar para muitos cultivos secundários (ervilha (pea), feijão (beans), batatas (potatoes),...) é abaixo de 1 hectare. Se a área mínima cartografada é para ser respeitada, no mapa de 1/25.000 estas parcelas menores têm que ser agrupadas às parcelas vizinhas e representadas como um misto de classes de ocupação do solo (ex.: complexo de culturas secundárias) e que deverá ser adicionada à chave de classificação. Mas esta solução está em conflito com os dois primeiros requisitos, descritos acima. Por outro lado, o mapeamento em grande escala (ex.: 1/2.500) é dificultado pelo limite de resolução espacial da informação do satélite: para ser classificado de uma forma segura, a mais pequena parcela (i.e., aquelas com área = MCA-Terrestre) deverá no mínimo incluir 1 pixel. Aparentemente o melhor compromisso de escala do mapa é a 1/10.000 (MCA -Terrestre =4 pixels = 0,16 hectares).

- Agrupamento espacial e espectral

O ponto de partida para qualquer interpretação de imagem é formado pelo grupo de imagens geometricamente corrigidas, compreendendo às camadas ou variáveis. Estas camadas correspondem a diferentes bandas espectrais nas diferentes imagens disponíveis. que, a qualidade final da interpretação irá aumentar com o número de registos disponíveis (e das bandas espectrais disponíveis). Quanto maior for a resolução espectral de uma imagem significa maior informação disponível e possivelmente melhor interpretação dessa imagem.

As bandas das imagens sobrepõem-se perfeitamente umas sobre as outras. Na visualização das imagens num ecrã pode imediatamente ser visto que os pixels estão agrupados em estruturas superiores, onde facilmente se reconhecem um número elevado de elementos lineares (estradas, rios, limites de parcelas, filas de árvores, vedações de vegetação (sebes),...) que delimitam outras áreas. Estas áreas são polígonos fechados de pixels adjacentes, com aspecto homogéneo na cor e na textura. Obviamente, estes segmentos de imagem correspondem a 'parcelas' no terreno. A extracção da informação referente a estas

áreas de aspecto homogéneo, espacial ou textural consegue-se por meio da segmentação de imagem.

O reconhecimento e delimitação destas áreas com características espectrais semelhantes é realizado com ajuda de um sistema de processamento de imagem, designando-se o processo em si de classificação de imagem, ou seja identificação dos diferentes tipos de ocupação do solo a partir da informação espectral disponível nas bandas espectrais. Cada banda fornece a informação presente em cada pixel através do valor digital ou número digital (ND) que o representa.

Se projectarmos as bandas no espaço multidimensional, normalmente de dimensão 3, ou seja, são analisadas no espaço 3 bandas pode-se observar agrupamentos de pixels, cuja sua posição não está distribuída de uma forma uniforme, mas tendem a agrupar-se em volta de posições centrais fixas. Neste caso, a ideia subjacente é de que cada agrupamento espectral corresponde a um certo tipo de classe de ocupação do solo (ex.: agrupamento 1 = trigo ("wheat"), agrupamento 2 = cevada ("barley"),...). Cada agrupamento espectral corresponde a uma classe k , e é caracterizada por um vector médio específico. O vector médio $\{K = \{uk, 1, \dots, uk, v, \dots, uk, Nv\}$ representa a média espectral temporal do comportamento da classe k de ocupação do solo.

- Variabilidade e fontes de erro

A interpretação de imagens seria fácil, se na medição espacial de dimensão n , cada classe de ocupação do solo correspondesse a um compacto e perfeitamente isolado agrupamento. Interpretado para a imagem espacial, isto implicaria que todas as parcelas de uma dada classe mostrassem um óptimo contraste com as classes vizinhas, de tal modo que a segmentação da imagem se tornasse um processo fácil de efectuar. No entanto, esta situação ideal nunca é atingida, porque na realidade, as classes de ocupação do solo têm uma alta variabilidade interna. Numa medição espacial multivariada, as classes são manifestamente alongadas com agrupamentos menos consistentes, e muitas vezes há uma moderada a forte sobreposição entre agrupamentos de diferentes classes. No espaço normal da imagem isto resulta na presença de uma menor aparente delimitação entre parcelas (transições graduais em vez de radicais), e que dificultam a segmentação. Neste sentido não são sempre evidentes as relações entre ambas as unidades espaciais (pixels e parcelas): muitas vezes é incerto de como os pixels deveriam ser agregados em parcelas. Esta variabilidade é uma propriedade geral da natureza. Se nós tomarmos a classe do milho por exemplo, uma certa variação pode ser observada entre parcelas, tais como diferenças de variedade, de cultivo, tratamento físico-químico, etc. Mesmo dentro de uma pequena parcela, importantes variações podem ocorrer devido às variações locais das características do solo, declive do terreno, densidade de plantação, etc. Claro que todas estas variações no "estado da classe" são transferidas para o nível da resposta espectral que é registado pelo sensor do satélite. No entanto, apesar desta variabilidade natural, a classe continua a mostrar uma forte tendência central.

De alguma forma antecipando a discussão do Item-B, pode já ser mencionado que os resultados da classificação pixel-a-pixel ("per-pixel classification") sofre sempre de uma baixa precisão. Na prática, muitas das más classificações são devido a dois tipos de fontes de erro:

Pixels mistos - pixels mistos ocorrem quando o pixel tem informação de diferentes tipos de ocupação do solo, sendo a sua resposta espectral obliqua e de pouca confiança. Devido à pouca confiança e imprevisibilidade na sua resposta espectral, os pixels misturados são geralmente mal classificados. Estes pixel podem surgir junto a superfícies de água, em que a área correspondente a um pixel esta na margem dessa superfície de água, sendo a sua informação espectral de dois ou mais tipos de ocupação do solo.

Pixels não representativos ou aberrante - A ideia de cartografia por parcelas-base" implica que todos os detalhes espaciais que caiam fora do nível da parcela são considerados irrelevantes. Por exemplo, mesmo que em parte um certo campo de milho esteja coberto por árvores isoladas ou com solo nu (devido à erosão, danos de pesticidas), todos os pixels dentro dos limites da parcela deverão ser classificados como milho. Mas na realidade este é um caso raro. Embora o procedimento de classificação possa estimar os pontos mencionados na ordem "correcta" (as árvores e o solo nu), o resultado deve ser considerado errado, porque eles

relatam os detalhes de dentro do campo, que são irrelevantes para o propósito do mapeamento de parcelas-base. Árvores isoladas e solo nu são pontos exemplares de pixels anómalos, que não são representativos para a cobertura do solo (neste caso milho) da parcela. Enquanto que os pixels mistos actuam nos limites do campo, os pixels aberrantes serão responsáveis por muitos erros de classificação no centro das parcelas.

Classificação digital de imagem

O primeiro passo consiste na elaboração de uma legenda apropriada. Esta é simplesmente a lista de todas as classes de ocupação do solo, em que cada classe é associada com um único código de classe k ($k=1\dots N_k$). Claro que a legenda deve ser adaptada à natureza da área em estudo (devendo conter todas as possibilidades de tipos de ocupação do solo) e dos objetivos específicos (ora poucas, extensas categorias, ou muitas classes detalhadas). A ideia básica da classificação pixel-a-pixel é a de que cada pixel tem de pertencer a uma destas unidades da legenda.

Em muitas circunstâncias, dispõe-se de um certo **conhecimento a priori da distribuição** relativa de classes na área. Deste modo, cada classe recebe uma probabilidade a priori específica ou "**peso da classe**" $P_u(k)$. Para a classificação de culturas, estes números podem derivar de mapas existentes ou de estatísticas oficiais do ano transacto.

Suponhamos agora que a área em estudo deverá ser classificada sem qualquer conhecimento adicional (medições de imagens), a única solução poderá ser o uso do peso da classe a priori. Contudo, esta estimativa inicial pode ser melhorada por inclusão de medições adicionais. A detecção remota fornece tal medição por cada pixel, nomeadamente para uma base de variáveis espectrais $V = 1\dots N_v$. Para classificação de imagens os valores de medição variam sempre de uma forma discreta e limitada nos mais de $28 = 256$ valores do intervalo de "8 bites" ou "byte" $= [0\dots 256]$.

A classificação de um pixel será parcialmente baseada na medição do seu vector específica x , e parcialmente nas probabilidades a priori $P_n(k)$ das classes consideradas.

Elaboração da base de dados de treino (TRAINING DATASET).

O ponto de arranque para qualquer classificação algorítmica é formado pelo agrupamento específico das diferentes classes territoriais de medições espaciais de dimensão N_v . O problema é claro pois no início estes agrupamentos das diferentes classes territoriais são desconhecidos, por isso terão que ser revelados em primeiro lugar. Mesmo que certos agrupamentos possam ser distinguidos visualmente na imagem, será difícil nesta fase dizer qual será a classe territorial correspondente! Esta parte descreve a abordagem mais frequente, o "treino supervisionado" (a abordagem alternativa é o "treino não supervisionado"). Para cada classe territorial k , temos que arranjar uma amostra dos "pixels de treino", para os quais se saiba a priori qual a classe a que pertencem. A base-informacional de treino (*training dataset*) compreende todos os pixels de treino, amostrados nas N_k classes. Tipicamente, esta base de dados amostrada no terreno (*ground truth*) compreende cerca 90 de 100 a 500 pixels de treino por cada classe, e como um todo representam cerca de 0.1% a 1.0% do total de pixels da população na imagem global.

Na prática, dois caminhos diferentes podem ser seguidos para se obter uma base informacional de treino que sirva para:

Foto-Interpretação: Esta rápida e fácil abordagem basta para as classificações gerais do solo com um n° limitado de categorias (ex.: água, campos cultivados, pastagens, florestas, áreas urbanas). Com alguma experiência e um conhecimento básico no comportamento espectral de diferentes tipos de ocupação do solo, estes limites de categorias podem ser facilmente reconhecidas. Através de programas especiais para computador, poderemos definir para cada classe um número de "polígonos de treino" que podem ser delineados pelo utilizador. A cada polígono será atribuído um código k da classe a que pertence).

Campanhas de campo ("field-surveys): A foto-interpretação é muito subjectiva para separar diferentes culturas. Como consequência, para classificar culturas de uma forma detalhada, a amostragem no terreno terá que ser bem realizada através de um bom inventário de campo.

Para cada classe, um n.º de parcelas é pesquisado no terreno. Os limites das parcelas (ou no pelo menos os limites das zonas homogêneas do centro das parcelas) são indicados no mapa. Posteriormente as delimitações são digitalizadas num sistema de informação geográfica de base vectorial e codificadas com a chave de classificação (k-valores). Em ambos os casos ("foto-interpretação" e por "campanhas de campo") terminamos com um n.º de polígonos de classe treino, num formato vectorial, e que cobrem as zonas de imagem para as quais a classe territorial é conhecida. Na observação do próximo procedimento (**cálculo da classe estatística**), a conversão da informação vectorial para rede (*raster*) é feita em todo o espaço vectorial da amostra de terreno. Dependendo da "grelha-temática", (ou seja dos atributos dos polígonos transcritos para as células das imagens rede (*raster*)), duas diferentes imagens rede podem ser criadas:

Rede da parcela da amostra no terreno (sequencial-nominal): Cada pixel é marcado com uma numeração sequencial única de identificação do polígono / parcela à qual pertence.

Rede da classe da amostra no terreno (nominal): Cada pixel é marcado com o código k da classe a que pertence. Claro que, as conversões são aplicadas de tal modo que ambos os resultados das imagens rede da amostra de campo se ajustam perfeitamente (em relação à posição e resolução do pixel) a imagens espectrais geometricamente corrigidas. No entanto, como a amostra do terreno apenas representa uma amostra limitada do total de pixels da população, a imagem rede (*raster*) da amostra no terreno (*ground truth*) será bem mais vazia. Tais células vazias serão preenchidas de um **valor de fundo** (*background value*), por convenção: na maior parte "0" para imagens de parcelas com formato *raster*, e "255" para imagens de classes de formato *raster*.

4.5.1. Classificação supervisionada ou assistida

Com a classificação supervisionada, identificam-se exemplos das classes de informação (isto é, tipos de cobertura do solo) com interesse na imagem. Estes são chamadas locais de treino. O software é então usado de forma a desenvolver uma caracterização estatística das refletâncias para cada classe de informação (ou local de treino). Este estágio é frequentemente chamado análise da assinatura espectral e pode envolver o desenvolvimento de uma caracterização tão simples quanto a média ou a variação das refletâncias em cada banda, ou tão complexa quanto análises detalhadas da media, da variância e da covariância em todas as faixas. Uma vez que a caracterização estatística foi conseguida para cada classe de informação, a imagem é então classificada examinando as refletâncias para cada pixel e fazendo uma decisão sobre que assinaturas se assemelham à maioria. Há diversas técnicas para fazer estas decisões, e estes são denominados frequentemente classificadores. A maioria dos softwares de processamento de imagem oferecerá mais do que um classificador. Os três classificadores supervisionados vulgarmente usados são: por Paralelepípedo, pela distância mínima à média, e pela probabilidade de máxima verosimilhança. Cada um destes emprega uma lógica diferente para atribuir pixels às classes.

Até ao momento só se processaram os dados de treino, isto é aquela pequena fracção (cerca de 0,5%) de pixels para os quais estão disponíveis imagens espectrais e informação da realidade do terreno. Através desta base de dados de treino, o agrupamento específico de cada classe na chave de classificação estabelecida pode ser revelada. Com este conhecimento queremos extrapolar para a imagem global, isto é toda a população de pixels (ou toda a área coberta pelo) conjunto de imagens. Ainda que a imagem global também abranja os pixels de treino (0,5%), estamos mais interessados nos resultados extrapolados para a restante área de pixels (99,5%).

- **Classificador por Paralelepípedo** – este método caracteriza cada classe definida pelas áreas de treino pelo intervalo de variação dos valores de cada classe em cada banda. O valor máximo e mínimo do nível espectral para cada classe em cada banda espectral utilizada na classificação. Cada pixel que não esteja no espaço definido pelo

paralelepípedo, não classe atribuída, fica por classificar. Este classificador é muito rápido na sua execução, o que é uma vantagem, no entanto quando há sobreposição de rectângulos (classes), os pixels que aí estão são arbitrariamente classificados numa das duas classes, sem qualquer critério, como esta ilustrado no exemplo da figura seguinte com as duas classes, deciduas e coníferas.

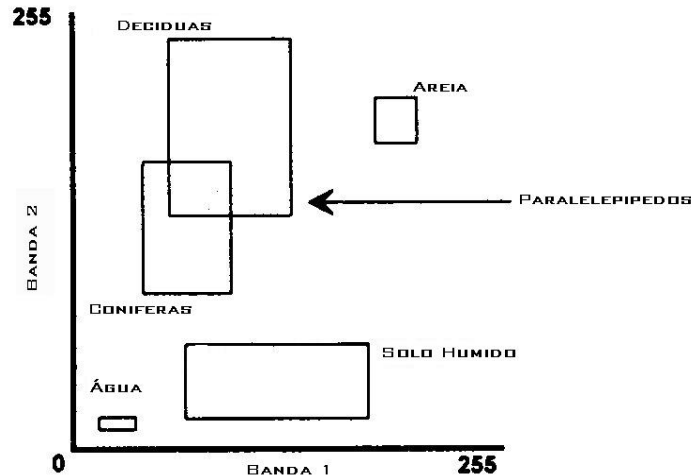


Figura 4.10 - Definição das classes no plano correspondente a duas bandas espectrais e os respectivos rectângulos. (Fonte: Manual do IDRISI)

- **Classificador por Distância mínima à média** – este tipo de classificador entra em conta com a distância mínima de cada pixel à média de cada classe definida com as áreas de treino (Figura 4.11). O cálculo da média de cada classe em cada banda definida pelas áreas de treino é a primeira etapa deste método. Em seguida é medida a distância de cada pixel a cada média, a classe cuja a distância é menor, vai ser atribuída a esse pixel. distância.

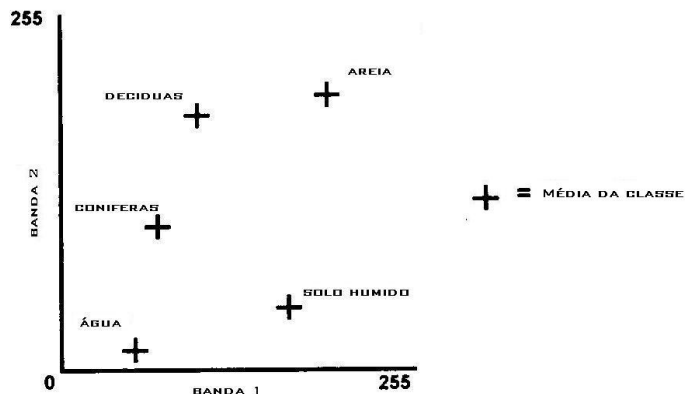


Figura 4.11 – Ilustração das médias das classes no espaço de duas bandas. (Fonte: Manual do IDRISI)

Na figura 4.12 o pixel não classificado vai ser atribuído à classe de areia, visto que é a esta classe que tem a menor distância. Este processo vai ser realizado para cada pixel da imagem.

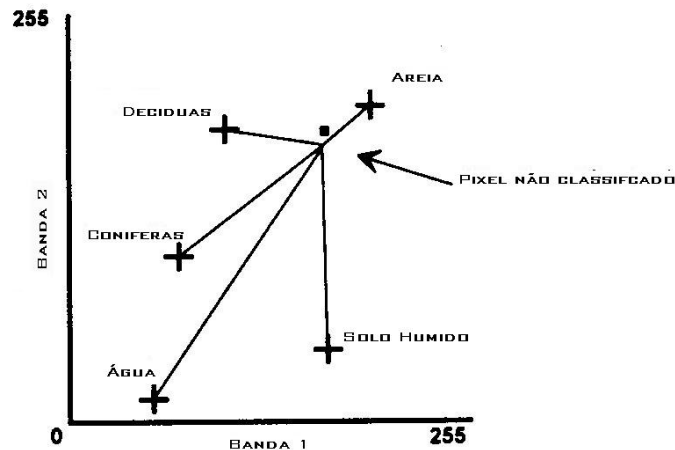


Figura 4.12 – Ilustração da distância à média de cada classe.
(Fonte: Manual do IDRISI)

Este método, no entanto, apresenta alguns problemas, pois não considera a grande variabilidade espectral presente em algumas classes. A Figura 4.13 apresenta um exemplo onde os círculos representam a variabilidade da classe de decíduas (bastante vasta) e de areia (muito concentrada, com pouca variabilidade), segundo este método o pixel não classificado será atribuído à classe de areia, no entanto se fosse considerada a variabilidade a classe correcta seria decíduas.

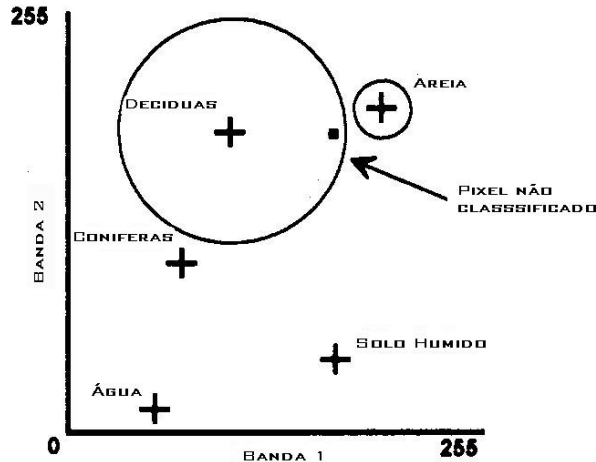


Figura 4.13 – Ilustração da variabilidade espectral das classes.
(Fonte: Manual do IDRISI)

Probabilidade de máxima verosimilhança – este método é baseado na regra de decisão de Bayes. Com a informação das áreas de treino para cada classe, este classificador usa a média e a variância/covariância das assinaturas espectrais de cada classe para estimar a probabilidade a posteriori do pixel pertencer a cada classe. A regra de decisão de Bayes tal como todas as regras objectivas de decisão (e julgamentos subjectivos), são utilizadas pelas pessoas de uma maneira intuitiva. Na prática duas condições têm que ser satisfeitas antes do pixel ser designado para uma dada classe X. Primeiro para garantir um valor relativamente alto de probabilidade para a classe em causa, o vector x do pixel deve apontar para uma posição

perto do centro da classe X. E segundo quando comparado com as outras classes definidas para legenda de classificação a classe X não deve ser bastante excepcional (grande peso de probabilidade da classe X).

4.5.2. Classificação não supervisionada ou não assistida

Contrastando com a classificação assistida, onde falamos sobre a característica do sistema (isto é, assinatura) das classes de informação que procuramos, a classificação não assistida não requer nenhuma informação avançada sobre as classes que interessam estudar. Em vez disso, divide a informação em agrupamentos espectrais mais evidentes, ou *clusters*, presentes nos dados. O classificador identifica então estes conjuntos como classes de cobertura de solo devido à familiaridade que este tem com a região e/ou com as visitas efectuadas aos locais. A lógica inerente a esta classificação é conhecida como análise de agrupamentos e é fornecida. Este tipos de classificadores, usam imagens compostas que combinam as informações mais úteis de diversas bandas. É importante reconhecer, entretanto, que os conjuntos que a classificação não supervisionada produz não são as classes de informação mas as classes espectrais (isto é, agrupam características (pixels) com padrões de refletância similares). É pois vulgar o classificador necessitar reclassificar classes espectrais em classes de informação. Por exemplo, os sistemas poderão ter identificado classes de asfalto e de cimento em duas classes espectrais diferentes, mas que são mais tarde agrupadas pelo classificador como uma classe de informação "pavimento".

A classificação não supervisionada está a tornar-se cada vez mais popular junto das agências envolvidas na manutenção de base de dados de SIG a longo prazo, principalmente porque há agora sistemas que usam os procedimentos de aglomeração que são extremamente rápidos e requerem pouco sobre a natureza dos parâmetros operacionais. Está assim a ser possível treinar analistas de SIG (que têm somente uma familiaridade geral com a detecção remota), de forma a que possam empreender classificações que apresentem os padrões de exigência da elaboração dos mapas. Com os procedimentos apropriados da avaliação da verdade no terreno e da sua exactidão, esta ferramenta pode fornecer meios notavelmente rápidos de produzir dados de cobertura de solo com uma boa qualidade e numa base continua.

4.5.3. Validação da classificação

Cada procedimento tem de ser validado, isto é a sua qualidade e viabilidade têm que ser julgadas. Tecnicamente, a validação pode ser executada de maneira automática num computador, se tivermos acesso a uma base de dados informacional do terreno para complementar com o resultado da classificação por pixel. Ambos as imagens são varridas simultaneamente e para cada pixel ambos os valores são comparados (o verdadeiro *k* da informação do terreno e o da classificação). Os resultados da comparação são sumariados numa matriz de confusão também designada por matriz de erro. A matriz de confusão providência a completa compreensão da qualidade do procedimento de classificação.

Uma importante chamada de atenção é que geralmente obtêm-se altas precisões (de 90% ou mais), se o resultado da classificação é comparado com os mesmos pixels de treino previamente utilizados para os exercícios de classificação. Ainda que tecnicamente fiável, este tipo de validação é cientificamente errada e além disso providencia valores que são sobre-estimados. Uma boa validação pode ser apenas realizada se a classificação for comparada com uma base de dados do terreno independente dos pixels das áreas de treino. Os pixels de teste são reunidos da mesma maneira que os pixels de treino (foto-interpretação ou campanhas de campo), mas não são usados para o treino do algoritmo de classificação. Muitas vezes, ambos os tipos de pixels são recolhidos simultaneamente e inicialmente são agrupados na mesma imagem do levantamento da realidade do terreno. Após os dados recolhidos, estas imagens são separadas em duas componentes. Devido à independência dos dados de teste, verifica-se que o valor de precisão obtido 69,2%, é uma estimativa independente da verdadeira (mas em princípio não conhecida) precisão do procedimento.

Erros de classificação e precisão geral

Torna-se claro que a precisão na classificação aumenta se todas as classes forem distribuídas em agrupamentos compactos e isolados. Quanto mais compactos os agrupamentos melhor será o acordo com a densidade normal e multivariada (o pressuposto básico da máxima verosimilhança), e menor é a probabilidade de se sobrepor a outros agrupamentos. Deve ficar retido na mente, que a classificação de imagem é puramente baseada nas potenciais diferenças entre o comportamento espectral/temporal entre os diferentes tipos de cobertura do solo. Se os grupos compactos ainda se sobrepuerem, isto significa simplesmente que ambas as classes envolvidas possuem características espectrais semelhantes e não podem ser divididas através da informação espectral do terreno. Esta básica limitação da classificação, ocorre frequentemente para as colheitas de semelhante fenologia, e consequentemente comportamentos espectrais dinâmicos. Por exemplo, na Bélgica, milho, beterrabas e batatas são todos semeados em meados de Maio e terminam juntos nos meses de Verão. Devido aos seus agrupamentos sobrepostos, estas colheitas serão sempre confundidas em alguma extensão. Considerando que o exemplo acima descrito sobre a sobreposição entre classes não pode ser evitada, em muitos outros casos alguma interferência humana é recomendada na luta contra os agrupamentos não compactos:

- A base espectral da classificação de imagem implica que a classificação chave seja também desenvolvida em níveis espectrais. Deste modo, não faz sentido incluir as classes que são identificadas em níveis não espectrais (eg, humanas, legais, administrativas,...). Por exemplo, protecção das áreas florestais ou reservas naturais.

- devem ser removidas da chave: elas somente diferem das unidades florestais no seu destino legal. Outro exemplo da agricultura é a distinção entre a grão de milho e forragem de milho, o que é unicamente baseado no destino da pós colheita (consumo humano ou forragem para gado). Para o resto estas colheitas são idênticas e não podem ser distinguidas na detecção remota.

- Realização de treino deficiente e erros no terreno conduzem a uma ideia tendenciosa do verdadeiro agrupamento: os agrupamentos (estimados) mostram mais dispersão do que têm na realidade. Por exemplo, por erro algum pixels de cevada podem ter-se infiltrado na nossa amostra de cultivo de trigo. Estes falsos pixels serão estranhos, ficarão longe do centro da verdadeira nuvem de trigo e resultarão numa excessiva avaliação da verdadeira dispersão da classe (matriz de covariâncias tendenciosa, determinante muito elevado).

- O efeito de pixels misturados (junto dos limites das parcelas) e pixels aberrantes (nos meio das parcelas) já foi discutida anteriormente (A3). Como a sua resposta espectral (valor digital) é irreal ou não representativa para a classe à qual eles pertencem, devem ser sempre removidos do conjunto das informações de treino. Dentro do possível, as classes mistas devem ser evitadas. Por exemplo há grupos de culturas, como feijões e grãos que formam duas simpáticas, compactas e isoladas nuvens de níveis radiométricos. Mas supondo que os tínhamos forçado a misturarem-se numa unidade mista, aconteceria que o agrupamento resultante tornar-se-ia muito alongado e bimodal. O vector médio deste agrupamento misto, irá apontar para o meio das nuvens originais, uma posição onde a frequência do pixel é actualmente muito baixa. Classes mistas são multimodais: elas consistem em diferentes subclasses cada uma com um cume separado. Deste modo formam grupos muito alongados, que certamente não conhecem a hipótese da máxima verosimilhança e que discordam completamente do esquema de classificação. Como tal, durante o treino deveriam ser separados nas suas subclasses componentes. A existência de grupos multimodais não é sempre tão evidente como está descrito no exemplo acima apresentado. Por exemplo a classe das “batatas” mostra frequentemente uma grande dispersão, devido às diferenças entre variedades nas datas das plantações (batatas precoces e tardias). Noutros casos, as classes mistas não podem ser evitadas. O melhor exemplo é o das áreas urbanas, que é uma densa mistura de diferentes componentes espectrais (asfalto colorido e betão, tectos vermelhos, jardins e outros elementos vegetais). Por esta razão, a classe urbana mostra sempre uma ampla dispersão através do espaço de medida. Como resultado, haverá sempre uma importante confusão entre áreas urbanas e todas as outras classes. O que quer que seja que o algoritmo usou, a classificação da imagem espectral resulta sempre de precisões que variam entre os 50 e 75%, dependendo do número disponível de registos de imagens, a qualidade da amostra de treino e do número de classes consideradas na chave. Para a maioria das aplicações, esta precisão é demasiado baixa para que possa ser útil. E do ponto de vista da

cartografia, a classificação por-pixel não pode ser considerada como um verdadeiro mapa: devido aos seus erros abundantes, tem um aspecto muito disperso com muitos pixels isolados, e a desejada agregação de pixels em parcelas não é alcançada. A baixa precisão é parcialmente devido ao facto de que a classificação por-pixel só explora o conteúdo da informação espectral, e negligência completamente a parte espacial/contextual. Por exemplo, a decisão de atribuir um dado pixel à classe da cevada é unicamente baseada na informação espectral (xvector) desse pixel particular. O estado espectral dos seus oito vizinhos não afecta a decisão. No entanto, se mais tarde aparece que aquele pixel estava rodeado por oito pixels de trigo, então é muito provável que a estimativa inicial (cevada) fosse errada. O objetivo de todos os procedimentos derivados da pós-classificação é a de incluir esse tipo de razões e a de restaurar o contexto espacial, negligenciado pela classificação por pixel. Para este objetivo, existe uma larga gama de diferentes técnicas de filtração por parcela. É a única técnica que resulta num mapa de culturas e de utilização do terreno baseado em parcelas.